

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Výpočet zkratových poměrů v průmyslovém
podniku**
**Calculation of Short Circuit Conditions in
Industrial Company**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lukáš Rohleder

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Výpočet zkratových poměrů v průmyslovém podniku
Calculation of Short Circuit Conditions in Industrial Company

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Problematika napájení a provozování sítí průmyslových podniků
2. Teoretický rozbor výpočtu zkratových poměrů
3. Popis provozních variant v síti průmyslového podniku
4. Výpočet maximálních a minimálních zkratových poměrů na rozvodnách vn
5. Kontrola zařízení z hlediska účinků zkratového proudu

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Trojánek Z., Hájek J., Kvasnica P.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách, SNTL Praha, 1987
2. Hradílek Z.: Elektroenergetika I a II. Skripta VŠB-TU, 1992 a 1993
3. Normy ČSN
4. Další literatura podle pokynů vedoucího diplomové práce

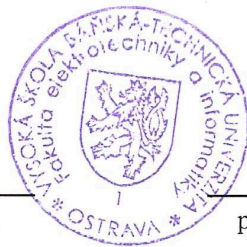
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

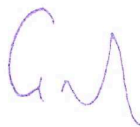
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 29. 4. 2016

Luděk Kolář.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce.

Dále děkuji také panu Ing. Marku Tinkovi, Ph.D. za poskytnutí potřebných materiálů a cenných rad při zpracování diplomové práce.

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce se zabývá problematikou napájení, provozování průmyslových sítí, popisuje možnosti řešení, uspořádání a požadavky kladené na rozvodné systémy. Následující kapitola blíže definuje pravidla, postup výpočtu minimálních a maximálních zkratových proudů, určuje vztahy pro stanovení impedancí jednotlivých prvků a zkratových proudů podle ČSN EN 60909-0. Praktická část práce řeší samotný výpočet minimálních a maximálních trojfázových zkratových proudů na všech rozvodnách vn průmyslového podniku, ověření zkratové odolnosti rozvodu vn a kontrole kabelů na dovolené oteplení při zkratu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zkrat, zkratový proud, zkratový výkon, počáteční souměrný rázový zkratový proud, impedance zkratového obvodu, rozvodna.

ABSTRACT

Theoretical parts deals with the problem of power supply and operation of industrial networks. It describes options of solutions, configuration requirements for distribution systems. The following section defines the rules and procedure of calculating the minimum and maximum short-circuit currents, determines formula for the determinations of impedance of the individual elements and short-circuit currents according to EN 60909-0. Practical part of thesis solves the calculation of minimum and maximum three-phase short-circuit current at all substation HV of an industrial company and includes checking short-circuit resistance and cable control due to warming during the short circuit.

KEY WORDS

Short-circuit, short-circuit current, short-circuit power, initial symmetrical short-circuit current, short-circuit impedance, substation.

OBSAH

1. ÚVOD	13
2. PROBLEMATIKA NAPÁJENÍ A PROVOZOVÁNÍ SÍTÍ PRŮMYSLVÝCH PODNIKŮ	14
2.1 ROZVOD ELEKTRICKÉ ENERGIE	14
2.1.1 ...Provedení a umístění transformátorů	14
2.1.2 ...Požadavky na průmyslové rozvody	15
2.1.3 ...Základní druhy rozvodných sítí	16
2.1.4 ...Přípojnicové systémy	18
2.1.4.1 Jednoduchý systém přípojníc	18
2.1.4.2 Dvojitý systém přípojníc	19
2.1.4.3 Trojitý systém přípojníc	19
2.1.5 ...Provedení rozvodných zařízení vvn	20
2.1.6 ...Provedení rozvodných zařízení vn	20
2.1.7 ...Rozvodná zařízení nn	21
2.1.8 ...Zásady pro zajišťování dodávky elektrické energie	22
2.2 ZPŮSOBY PROVOZU UZLU TRANSFORMÁTORU	22
2.2.1 ...Sítě izolované	22
2.2.2 ...Sítě kompenzované	23
2.2.3 ...Sítě uzemněné	23
2.3 RUŠIVÉ JEVI V PRŮMYSLVÝCH SÍTÍCH	23
2.3.1 ...Nesymetrie napětí	23
2.3.2 ...Kolísání napětí	24
2.3.3 ...Vyšší harmonické	24
2.3.3.1 Opatření pro omezení harmonických	26
3. TEORETICKÝ ROZBOR VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	28
3.1 NÁZVOSLOVÍ A CHARAKTERISTIKA ZKRATOVÝCH VELIČIN PODLE ČSN EN 60609-0	28
3.2 PRŮBĚH ZKRATOVÝCH PROUDŮ	29
3.3 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	30
3.4 METODA VÝPOČTU EKVIVALENTNÍ NAPĚŤOVÝ ZDROJ V MÍSTĚ ZKRATU	30
3.5 PODMÍNKY VÝPOČTU MAXIMÁLNÍCH ZKRATOVÝCH PROUDŮ	31
3.6 PODMÍNKY VÝPOČTU MINIMÁLNÍCH ZKRATOVÝCH PROUDŮ	32
3.7 ZKRATOVÁ IMPEDANCE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	32
3.7.1 ...Síťové napáječe	32
3.7.2 ...Dvouvinuťové transformátory	33
3.7.3 ...Venkovní vedení a kabely	34
3.7.4 ...Synchronní generátory	35
3.7.5 ...Asynchronní motor	36
3.7.6 ...Vztahy pro výpočet zkratových proudů ve fyzikálních jednotkách	37
4. POPIS PROVOZNÍCH VARIANT V SÍTI PRŮMYSLVÉHO PODNIKU	38
4.1 PROVOZOVÁNÍ VN ROZVODEN VARIANTA Č. 1 – KLASICKÝ PROVOZ	38
4.2 PROVOZOVÁNÍ VN ROZVODEN VARIANTA Č. 2	39
4.3 PROVOZOVÁNÍ VN ROZVODEN VARIANTA Č. 3	39
4.4 PROVOZOVÁNÍ VN ROZVODEN VARIANTA Č. 4	40
5. VÝPOČET MAXIMÁLNÍCH A MINIMÁLNÍCH ZKRATOVÝCH POMĚRŮ NA ROZVODNÁCH VN	41

5.1	VÝPOČET NÁHRADNÍCH PRVKŮ PRŮMYSLOVÉ SÍTĚ.....	41
5.1.1	...Výpočet minimálních zkratových poměrů varianty č. 1	47
5.1.2	...Výpočet minimálních zkratových poměrů varianty č. 2	48
5.1.3	...Výpočet minimálních zkratových poměrů varianty č. 3	49
5.1.4	...Výpočet minimálních zkratových poměrů varianty č. 4	50
5.1.5	...Výpočet maximálních zkratových poměrů varianty č. 1.....	51
5.1.6	...Výpočet maximálních zkratových poměrů varianty č. 2.....	54
5.1.7	...Výpočet maximálních zkratových poměrů varianty č. 3.....	57
5.1.8	...Výpočet maximálních zkratových poměrů varianty č. 4.....	59
6.	KONTROLA ZAŘÍZENÍ Z HLEDISKA ÚČINKŮ ZKRATOVÉHO PROUDU	63
6.1	POSOUZENÍ ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODEN VN.....	63
6.2	KONTROLA KABELŮ VN NA OTEPLENÍ PŘI ZKRATU	64
6.2.1	...Příklad výpočtu kontroly kabelu z rozvodny R1 do rozvodny R23.....	66
7.	ZÁVĚR.....	70
	LITERATURA.....	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

SEZNAM NĚKTERÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

c		napěťový koeficient
ČSN		česká technická norma
d	(m)	geometrická střední vzdálenost mezi vodiči nebo středním vodičem
EN		evropská norma
f	(Hz)	frekvence sítě
f_r	(Hz)	rezonanční frekvence
HDO		hromadné dálkové ovládání
h		řád harmonické
I_b	(A)	souměrný zkratový vypínací proud
I_k	(A)	ustálený zkratový proud
I_k''	(A)	počáteční souměrný rázový zkratový proud
I_{kQ}''	(A)	počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q
I_{rM}	(A)	jmenovitý proud motoru
I_{rT}	(A)	jmenovitý proud transformátoru na sekundární straně
I_{th}	(A)	ekvivalentní oteplovací zkratový proud
$i_{d.c.}$	(A)	stejnoseměrná složka zkratového proudu
i_p	(A)	nárazový zkratový proud
K		koeficient určující minimální průřez vodiče podle oteplení při zkratu
K_T		korekční součinitel impedance síťových transformátorů
K_G		korekční součinitel impedance synchronních generátorů
K_T		korekční součinitel impedance elektrárenských bloků
n		počet vodičů ve svazku
nn		hladina nízkého napětí
P_{krT}	(W)	jmenovité ztráty transformátoru nakrátko
q_n	(mm ²)	jmenovitý průřez vedení
R_k	(Ω)	výsledná rezistance zkratového obvodu
R_L	(Ω)	rezistance vedení při 20 °C
r	(m)	poloměr vodiče
ΔS_A	(VA)	změna výkonu zátěže
S_{kV}	(VA)	zkratový výkon v místě připojení
S_{rM}	(VA)	jmenovitý zdánlivý příkon motoru
S_{rT}	(VA)	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
t_k	(s)	maximální doba vypnutí zkratu
t_r		jmenovitý převod transformátorů
$\Delta U, \Delta U_f$	(V)	změna sdružených napětí, změna fázových napětí
U_n	(V)	jmenovité sdružené napětí

U_{nf}	(V)	jmenovité fázové napětí
U_{rM}	(V)	jmenovité napětí motoru
U_{nQ}	(V)	jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q
U_{rT}	(V)	jmenovité napětí transformátoru na sekundární straně
U_{rG}	(V)	jmenovité napětí generátoru
$U_{(1)}$	(V)	sousledná složka napětí
$U_{(2)}$	(V)	zpětná složka napětí
$U_{(0)}$	(V)	nulová složka napětí
u_h		relativní amplituda h-té harmonické vztažené k základní
u_{kr}	(%)	jmenovité napětí nakrátko
u_{Rr}	(%)	činná složka jmenovité napětí nakrátko
v_n		hladina vysokého napětí
v_{vn}		hladina velmi vysokého napětí
X_d''	(Ω)	rázová reaktance generátoru
X_k	(Ω)	výsledná reaktance zkratového obvodu
x_d''	(%)	poměrná rázová reaktance generátoru
x_T		poměrná reaktance transformátoru
Z_k	(Ω)	výsledná impedance zkratového obvodu
$Z_{(1)}$	(Ω)	výsledná sousledná impedance zkratového obvodu
$Z_{(2)}$	(Ω)	výsledná zpětná impedance zkratového obvodu
$Z_{(0)}$	(Ω)	výsledná netočivá impedance zkratového obvodu

Ostatní symboly a zkratky jsou vysvětleny v textu.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Kompenzace.....	15
Obr. 2.2: Druhy rozvodných sítí [6]	16
Obr. 2.3: Sít' dvoupaprsková (rozvodná zařízení s podélně dělenými přípojnici) [2]	17
Obr. 2.4: Sít' dvoupaprsková kombinovaná se sítí okružní [2].....	17
Obr. 2.5: Sít' dvoupaprsková (rozvodná zařízení s dvojitými přípojnici) [2]	18
Obr. 2.6: Jednoduchý systém přípojníc [12]	18
Obr. 2.7: Dvojitý systém přípojníc [12]	19
Obr. 2.8: Trojitý systém přípojníc [12]	19
Obr. 2.9: Rozdělení prostorů ve skříňovém rozvaděči [5]	21
Obr. 2.10: Způsoby provozu uzlu transformátoru [6]	22
Obr. 2.11: Připojení pasivního paralelního filtru [4].....	27
Obr. 2.12: Aktivní filtr sériově zapojený [4].....	27
Obr. 2.13: Aktivní filtr paralelně zapojený [4].....	27
Obr. 3.1: Zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou [11]	29
Obr. 3.2: Zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou [11]..	30
Obr. 5.1: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu na rozvodně R1 varianta č. 1	47
Obr. 5.2: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu na rozvodně R1 varianta č. 2	48
Obr. 5.3: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu na rozvodně R1 varianta č. 3	49
Obr. 5.4: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 4 ...	50
Obr. 5.5: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 1 ...	51
Obr. 5.6: Postupné zjednodušení náhradního schématu varianta č. 1	52
Obr. 5.7: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 2 ...	54
Obr. 5.8: Postupné zjednodušení náhradního schématu varianta č. 2	55
Obr. 5.9: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 3 ...	57
Obr. 5.10: Postupné zjednodušení náhradního schématu varianta č. 3	58
Obr. 5.11: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 4 .	60
Obr. 5.12: Postupné zjednodušení náhradního schématu varianta č. 4	61
Obr. 6.1: Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu [11].....	65
Obr. 6.2: Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu [11]	65

SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1: Úrovně harmonických napětí ve společném napájecím bodě [4]	26
Tab. 3-1: Napěťový koeficient c	31
Tab. 4-1: Umístění jednotlivých zařízení	38
Tab. 5-1: Zkratové poměry R110 kV Lískovec.....	41
Tab. 6-1: Zkratová odolnost rozvoden	63
Tab. 6-2: Koeficient K pro určení minimálního průřezu vodičů podle oteplení při zkratu.....	64
Tab. 6-3: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R1 Sever	67
Tab. 6-4: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R2 Kvarto Siemag	67
Tab. 6-5: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R3 Kvarto Fučík	68
Tab. 6-6: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R4 Trafopásek I.....	68
Tab. 6-7: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R5 Teplárna.....	68
Tab. 6-8: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R6 Teplárna.....	69
Tab. 6-9: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R13 Trafopásek II.....	69
Tab. 7-1: Kabely nevyhovující kontrole na dovolené oteplení při zkratu	70

1. ÚVOD

Elektrická energie je vyráběna v elektrárnách různých druhů a velikostí. Přenosové soustavy přenášejí elektrickou energii na velké vzdálenosti s dostatečnou účinností a jsou zakončeny elektrickými uzlovými stanicemi. Přenos je uskutečněn venkovními vedeními o napětových hladinách 400 a 220 kV. Z uzlových stanic jsou dále napájeny distribuční rozvodné soustavy, které mají charakter venkovního nebo městského rozvodu. V průmyslových závodech navazují na veřejnou soustavu průmyslové sítě.

Průmyslové závody představují největší spotřebitele elektrické energie. V současné době odebírají přibližně 65 % vyrobené elektrické energie. V budoucnu lze očekávat zvýšení spotřeby elektrické energie s rostoucím zastoupením automatizačních strojů v průmyslu.

Uspořádání a výběr rozvodných systémů v průmyslových závodech musí vést k provozně spolehlivým a ekonomicky výhodným řešením. Vhodnost řešení záleží na rozloze závodu, požadavcích provozu, velikosti a druhu instalovaných zařízení. Uspořádání průmyslové sítě má vliv na rozdělení výkonů, velikost zkratových proudů, úbytky napětí. Tímto jsou určeny hlavní parametry rozvodných zařízení a jejich vybavení.

Volba napětí napájecích rozvodů a počet napětových hladin závisí na mnoha okolnostech. Především je to otázka optimálního řešení s ohledem na investiční a provozní náklady. Mezi jednotlivé napětové hladiny je nutné vybudovat transformovny představující značné investice, a proto je vhodné průmyslové závody řešit s minimálním počtem napětových hladin.

Všechny části průmyslového rozvodného systému musí být navrženy a funkčně skloubeny tak, aby tvořily celek plnící požadavky a funkce, pro které jsou určeny.

Zkraty jsou nejrozšířenější poruchy v přenosové soustavě. V kabelových sítích se nejčastěji vyskytují třífázové zkraty přibližně až 90 % u vn. Působením oblouku při malých vzdálenostech mezi fázemi dochází k poškození izolace všech fází a ostatní druhy zkratů snadno přechází v třífázový.

Při zkratu dochází k náhlému poklesu napětí a impedance elektrického obvodu. Obvykle v místě zkratu vznikají přechodové odpory (odpor oblouku), které jsou ve výpočtu zanedbány. Nejvíce je ohroženo místo zkratu, kterým protéká od chvíle vzniku až do doby přerušení mnohonásobek proudu provozního. Je tedy nezbytné počítat s tepelnými i dynamickými účinky tohoto zkratového proudu a zařízení správně navrhnout, neboť by mohlo dojít k poškození vinutí alternátorů, transformátorů, kabelů a spínacích přístrojů.

2. PROBLEMATIKA NAPÁJENÍ A PROVOZOVÁNÍ SÍTÍ PRŮMYSLÝCH PODNIKŮ

Rozvody elektrické energie v průmyslových závodech jsou napájeny z veřejné rozvodné soustavy. Podle velikosti odebíraného výkonu jsou výrobní podniky připojeny na různé napěťové hladiny. Velké průmyslové závody se obvykle připojují na napětí 110 kV, střední závody na síť vn a jen zcela malé výrobní haly jsou napájeny z veřejné soustavy nn. [1]

Průmyslové závody jsou charakterizovány velkou hustotou odběru na km², kde dochází k častému spínání strojů o velkých výkonech. V návrhu průmyslového rozvodu musí být zahrnutý opatření proti kolísání napětí při spínání velkých zařízení, proti nesymetrii a vyšším harmonickým. Nedílnou součástí musí být i kompenzace účinníku v rozmezí 0,95 - 1 induktivního charakteru. [3]

2.1 Rozvod elektrické energie

Elektrická energie z rozvodné soustavy je přiváděna jedním i více venkovními či kabelovými vedeními, podle zajištění požadovaného stupně důležitosti dodávky elektrické energie, do vstupní spínací stanice nebo transformovny. Ze vstupní stanice jsou rozvodem napájeny podružné stanice (transformovny), rozvaděče a jednotlivé výrobní soubory. Průmyslové rozvody se provádějí přípojnicovými a kabelovými vedeními. Počet napěťových soustav v průmyslových objektech závisí na rozlehlosti závodu, velikosti odběrů a napětí spotřebičů.

Napájecí rozvody jsou realizovány těmito druhy sítí:

- 110 kV s účinně uzemněným uzlem,
- 35 – 6 kV s neúčinně uzemněným uzlem. [1]

2.1.1 Provedení a umístění transformátorů

Hlavní zásadou pro budování transformátorů je, aby byly umístěny co nejbližší místu spotřeby. Realizace stanoviště transformátoru závisí na velikosti, druhu transformátoru a na okolních zařízeních. Podle druhu rozeznáváme transformátory suché se silikonovou izolací, které je vhodné používat v průmyslu a lze je umístit ve skříních ve výrobních halách, jedná se o transformátory vn/nn. Druhou skupinu tvoří transformátory olejové umístěné ve skříňových rozvaděčích s olejovou jímkou, transformátorových komorách nebo venkovních stanovištích. Takto jsou řešeny všechny transformátory vv/vn a převážná většina vn/nn.

Transformovny musí být situovány tak, aby nemohlo dojít ke kontaminaci povrchových a podzemních vod ani v případě havárie. Stanoviště venkovních transformátorů je složeno z betonového základu, jehož výška závisí na způsobu dopravy transformátoru. Pod transformátorem musí být jímka nebo šterkové lože pro zachycení popřípadě odvod oleje. Aby byla zajištěna požární bezpečnost, vnitřní olejové transformátory se instalují do samostatných větraných komor. Strop, stěny i dveře jsou z nehořlavého materiálu. Tyto komory se umísťují na severní nebo východní straně objektu z důvodu řádného chlazení. [12]

2.1.2 Požadavky na průmyslové rozvody

Primární požadavek kladený na průmyslový rozvod je umožnění přenosu elektrické energie v požadované kvalitě od zdroje až po jednotlivé spotřebiče. Vhodnost použití rozvodných systémů je v každém průmyslovém závodě odlišná, daná požadavky odvětví. Na průmyslové rozvody jsou kladeny tyto nároky:

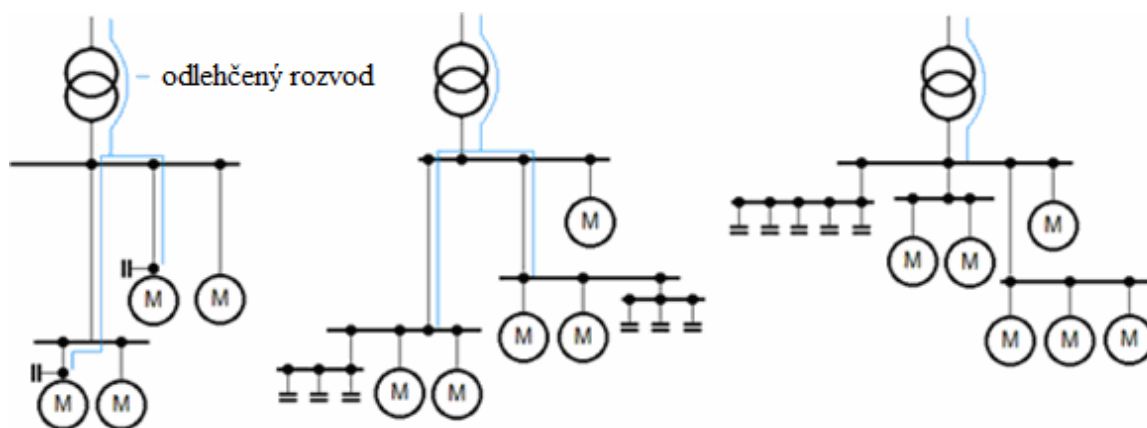
- Provozní spolehlivost při daném vlivu prostředí,
- bezpečnost osob a vlastního zařízení,
- automatické odepnutí vadných částí a rychlé odstranění těchto poruch,
- přehlednost rozvodu,
- přizpůsobitelnost při přemísťování strojů, možnost rozšíření,
- vzhled,
- investiční náklady,
- hospodárnost rozvodu.

Na některé z uvedených parametrů má vliv i velikost zkratových výkonů v soustavě. Při velkých zkratových proudech je nutné zařízení bohatě dimenzovat. Proto je vhodné rozvodný systém rozdělit na menší části, aby byly výsledné zkratové proudy co nejmenší.

Dalším velmi důležitým požadavkem je i otázka úbytku napětí v rozvodném systému. Dimenzování musí být provedeno tak, aby na svorkách spotřebičů napětí nekleslo pod hodnoty dané normami. Jedná se především o nn rozvod při spínání těžkých pohonů.

Převážná většina strojů v průmyslových závodech jsou asynchronní motory, které zatěžují rozvod jalovým proudem. Je tedy nutné kompenzovat velikost jalového proudu tak, aby bylo dosaženo hospodárnějšího rozvodu, neboť i jalová složka proudu přispívá k celkovým ztrátám v rozvodu.

Kompenzace účinníku je nejčastěji provedena pomocí statických kondenzátorových baterií, obsahuje-li průmyslový závod synchronní motory, lze využít i toho způsobu. Podle rozmístění motorů v průmyslovém závodě rozděluje kompenzaci na individuální, skupinovou a centrální. [2]



Obr. 2.1: Kompenzace

2.1.3 Základní druhy rozvodných sítí

Paprskový rozvod

Kabelové vedení vycházející ze spínacího místa zásobuje jednotlivé odběry. Tento rozvod je ekonomicky nejvýhodnější, používaný v menších průmyslových závodech, kde nejsou kladeny zvýšené nároky na provozní spolehlivost. Při poruše některého z paprsků není zajištěno náhradní napájení, což je největší nevýhoda tohoto rozvodu.

Průběžný rozvod

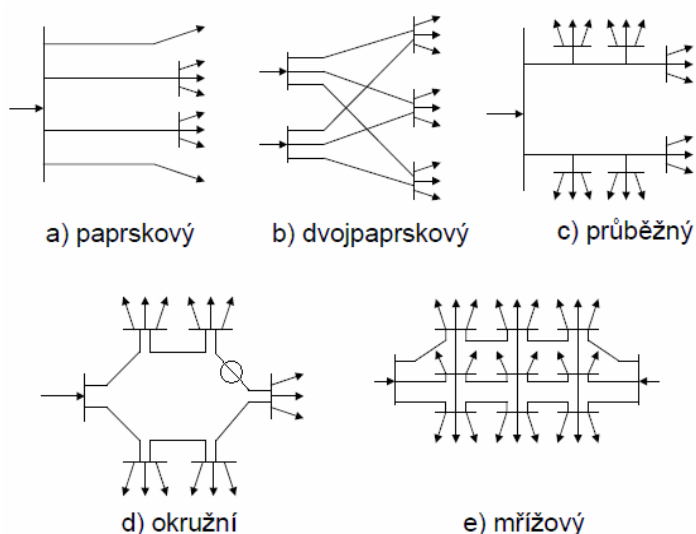
Tento rozvod je vhodný pro napájení větších a rozsáhlejších průmyslových hal s drobnějšími spotřebiči. Vyznačuje se dlouhým průběžným vedením, ze kterého jsou vedeny odbočky pro napájení jednotlivých spotřebičů nebo podružných rozvodnic. Provozní spolehlivost je poměrně nízká jako u paprskového rozvodu.

Okružní rozvod

Síť je provozována buď jako rozepnutá, jedná se paprskový rozvod, nebo sepnutá. Jednotlivé paprsky nebo polosmyčky jsou vedeny tak, aby se daly sepnout. Okružní sítě jsou dražší než paprskové, jelikož při vzájemném spojení je potřeba větších délek vodičů. Výhodou je možnost napájení spotřebičů ze dvou stran, čímž vzroste zabezpečení dodávky elektrické energie. U rozepnutých sítí lze odlehčit přetížené vývody sepnutím s vývodem málo zatíženým, a tím je možné docílit rovnoměrného zatížení vývodů.

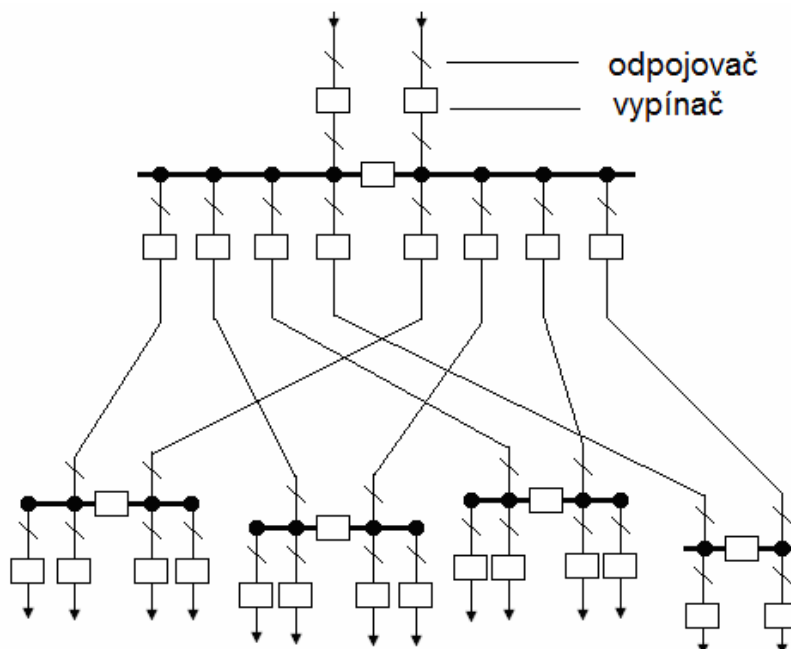
Mřížový rozvod

Mřížový rozvod je vytvořen alespoň dvěma napájecími transformátory pracující do společné sítě. Tento rozvod může pokrývat i velké plochy s četnými odběry elektrické energie a je vhodný pro napájení městské zástavby nebo rozsáhlých průmyslových závodů. Kabelové vedení je v křižovatkách propojováno do uzlů. Tak vzniká rozvod, ve kterém jsou podružné rozvaděče napájeny ze dvou i více směrů. Mřížový rozvod má vysokou provozní spolehlivost díky variabilitě napájecích cest. Na druhou stranu se vyznačuje značnými pořizovacími náklady a menší využitelností spojovacích kabelů.[3]

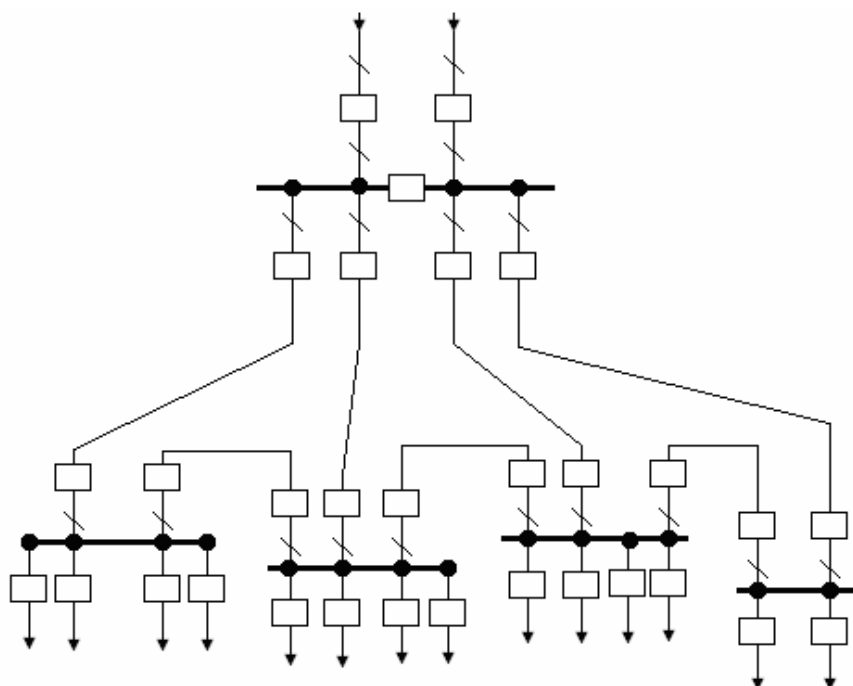


Obr. 2.2: Druhy rozvodných sítí [6]

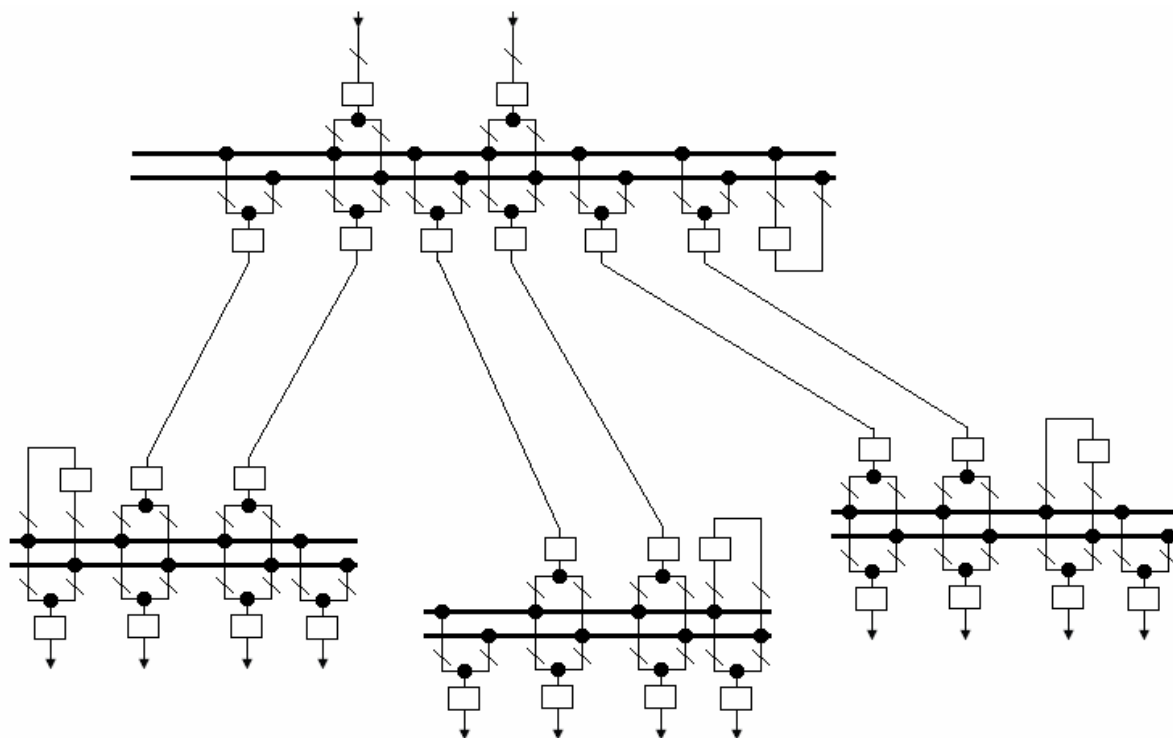
Další druhy rozvodních sítí lze získat kombinací výše uvedených druhů nebo jejich zdvojením. Tímto způsobem získáme dvojpaprskové sítě. Kombinací různých druhů sítí se jejich vlastnosti mění. Otázkou jaký druh sítě zvolit pro daný průmyslový rozvod záleží jak na ekonomickém a technickém rozboru, taktéž na stupni důležitosti dodávky elektrické energie. [2]



Obr. 2.3: Síť dvoupaprsková (rozvodná zařízení s podélně dělenými přípojniciemi) [2]



Obr. 2.4: Síť dvoupaprsková kombinovaná se sítí okružní [2]



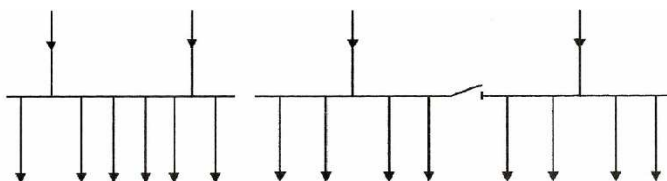
Obr. 2.5: Síť dvouprusková (rozvodná zařízení s dvojími přípojnicemi) [2]

2.1.4 Přípojnicové systémy

V rozvodných zařízeních vn a nn se přípojnice provádí z holých plochých tyčí z elektrovedného hliníku. Přípojnice venkovních rozvodných zařízení vvn jsou z ocelohliníkových AlFe lan s průřezem větším než 350 mm^2 nebo případně ze svazkových vodičů s rozpěrkami. U vnitřního provedení se nejčastěji používají profilované vodiče. Vzdálenost mezi jednotlivými fázemi a průřez přípojnic závisí na provozních stavech, jako jsou zatěžovací proudy a napětí, ale i na poruchových proudech s ohledem na tepelné a dynamické namáhání. [12]

2.1.4.1 Jednoduchý systém přípojnic

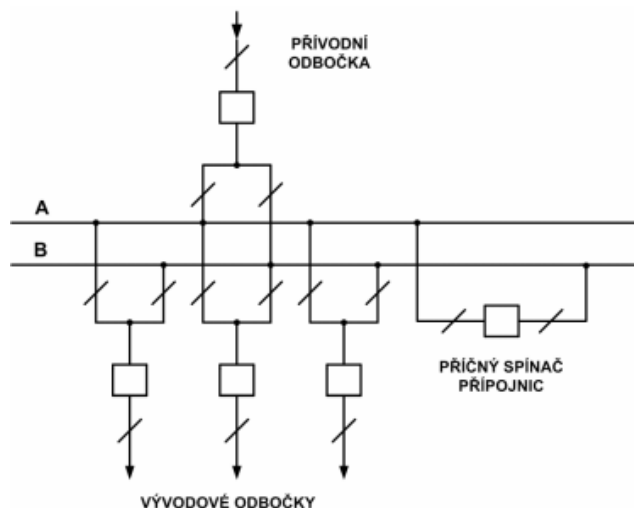
Použití jednoduchého systému přípojnic je limitováno stupněm důležitosti dodávky elektrické energie, požadavkem na nepřerušovaný provoz při revizích a opravách. Pro zajištění napájení lze přípojnice podélně rozdělit na sekce. [12]



Obr. 2.6: Jednoduchý systém přípojnic [12]

2.1.4.2 Dvoj itý systém přípojnic

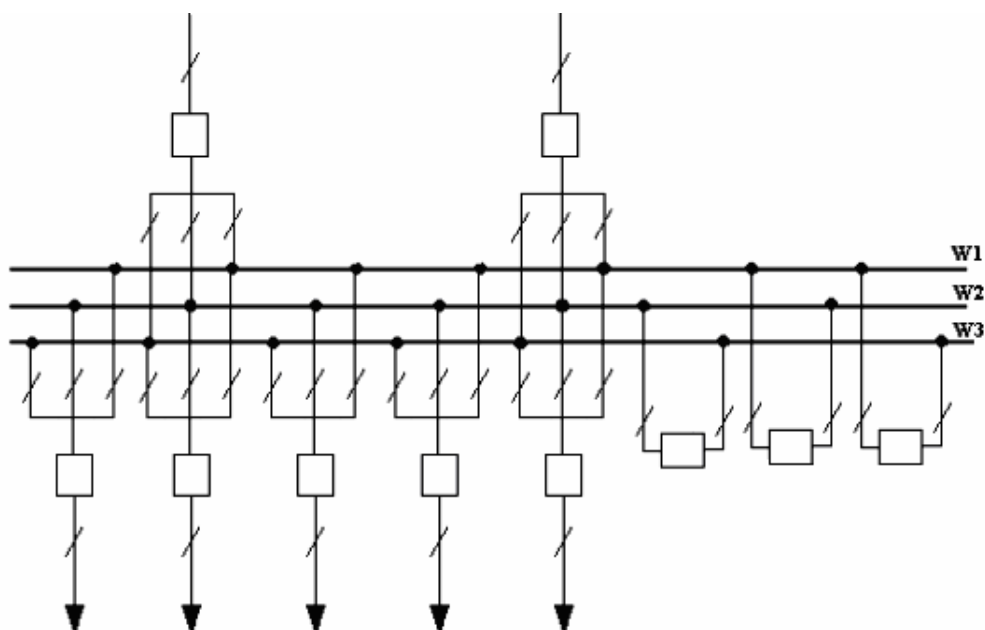
Tento systém je vybaven příčným spínačem přípojnic, aby mohlo docházet k přepojování odboček na druhý systém bez přerušení provozu. Dvoj itý systém přípojnic je tedy výhodné použít tam, kde není přípustné ani krátkodobé přerušení dodávky při opravách a revizích nebo, kde je nutné rozdělení zdrojů k omezení zkratových proudů. [12]



Obr. 2.7: Dvoj itý systém přípojnic [12]

2.1.4.3 Trojitý systém přípojnic

Použití trojitého systému přípojnic připadá v úvahu v situacích, kdy dvoj itý systém přípojnic musí být v trvale odděleném provozu a pro revizi přípojnic není přípustné ani krátkodobé přerušení dodávky. Přerozdělením přípojnic do tří skupin docílíme zmenšení zkratových proudů. [12]



Obr. 2.8: Trojitý systém přípojnic [12]

2.1.5 Provedení rozvodných zařízení vvn

Rozvodny vvn lze rozdělit podle izolačního média, ve kterém se jednotlivé prvky rozvodného zařízení nacházejí.

- Vzduch při atmosférickém tlaku.
- Fluorid sírový.

Obě tato řešení rozvodn mohou být umístěna na venkovních prostranstvích, nebo v budově. Provedení podle prvního bodu je typické pro venkovní umístění, zatímco zapouzďené rozvodny kladou malé nároky na zastavěný prostor, jsou tedy výhodné v městských aglomeracích. Dalšími výhodami zapouzďených rozvodn jsou vysoká spolehlivost, vysoká provozní bezpečnost, dlouhá životnost, malé požadavky na údržbu. Tyto výhody jsou však vykoupeny mnohem vyššími investičními náklady na pořízení. V náročných průmyslových podmínkách kde hrozí silné znečištění, je použití tohoto systému často jediným vhodným řešením. [12]

Zapouzďené rozvodny jsou sestaveny z tlustostěnných válcových rour. Jednotlivé části přípojnice, odpojovače, uzemňovače jsou uzavřeny do jednotlivých pouzder, které navzájem tvoří oddělené prostory naplněné fluorem sírovým o tlaku 0,25 - 0,45 MPa.

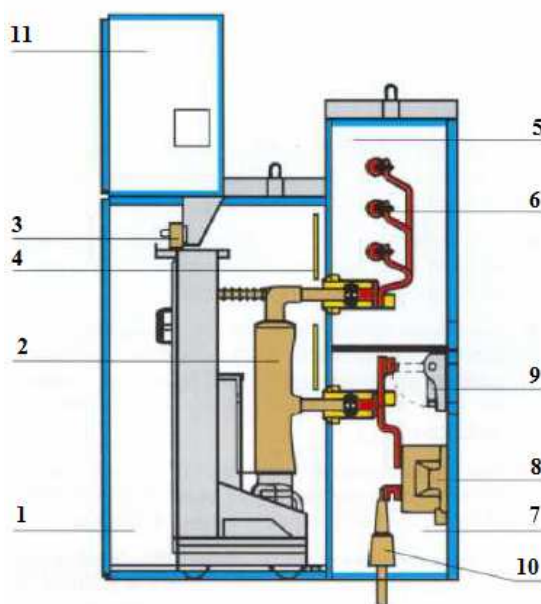
Tlak zhášecího plynu výkonových vypínačů může být stejný jako izolační nebo i větší. Pro každý pól vypínače je řešen samostatný pohon, takže umožňuje i jednopólové opětovné zapnutí. Pohon bývá řešen jako elektrohydraulický, střadačový nebo i tlakovzdušný s vlastním kompresorem. Pro měření jsou používány indukční jednofázové měniče proudu a napětí. [5]

2.1.6 Provedení rozvodných zařízení vn

Rozvodná zařízení vn jsou v dnešní době řešena jako skříňové rozváděče. Veškeré vybavení, přístroje, propojení a přípojnice jsou umístěny v plechových skříních, díky tomu je chráněna obsluha před nebezpečným dotykem. Skříňové rozváděče jsou vhodné do průmyslových rozvodn jak z důvodu minimálních nákladů na stavební úpravy, tak i možnosti instalace do prostor nečistých. Rozváděč je smontován ze samostatných modulů, které umožňují různorodé provedení skříní. Uvnitř skříně jsou instalovány přepážky zabraňující dotyku živých částí při zasunutém podvozku i v poloze vypínače mimo skříň. Vypínač je osazen na pojízdném podvozku, vývody jsou opatřeny růžicovým kontaktem, který se nasouvá na pevný kontakt. Umístění vypínače na pojízdném podvozku je výhodné, jelikož dochází k viditelnému rozpojení proudovodné dráhy.

Druhy vypínačů osazených v rozváděčích:

- Maloolejové - vhodné pro méně náročné rozvody.
- S fluorem sírovým - v dnešní době jsou běžně používány, spolehlivě vypínají v celém rozsahu proudu.
- Vakuové - jedná se o nejnovější řešení vypínače nevyžadující údržbu a je charakterizován malými rozměry. [12]



Obr. 2.9: Rozdělení prostorů ve skříňovém rozvaděči [5]

1 - vypínačový modul, 2 - výsuvný podvozek s vypínačem, 3 - konektor pomocných obvodů, 4 - posuvné clony, 5 - přípojnicový modul, 6 - přípojnice, 7 - modul kabelového připojení, 8 - měnič proudu, 9 - zemní zkratovač, 10 - kabelová koncovka, 11 skříň nn

2.1.7 Rozvodná zařízení nn

Rozvodná zařízení nízkého napětí jsou budována jako rozvodny s rozváděči. Rozváděč je konstrukční celek kompletovaný z většího počtu vestavěných přístrojů, ve výrobním závodě a dopravován na místo určení včetně vnitřních spojů. Rozváděče nízkého napětí v elektrických stanicích jsou určeny pro napájení vlastní spotřeby a jako rozváděče ovládací. V průmyslových sítích napájí skupiny nn spotřebičů.

Zapouzdřené rozvodnice jsou buď samostatné nebo tvořené sestavou zapouzdřených skříněk, obsahující přípojnice, spínací přístroje, pojistky nebo celé skupiny přístrojů. Jednotlivé skřínky jsou sešroubovány k sobě a přichyceny ke společnému rámu. Po odkrytí zaslepených otvorů v bočních skříňkách je provedeno vzájemné elektrické propojení. Vzhledem k robustnějšímu provedení a vyššímu stupni krytí jsou tyto rozváděče určeny pro nejtěžší prostředí.

Přípojnicový rozvod nn je vhodný zejména do průmyslových objektů s velkým množstvím spotřebičů a častými změnami v konfiguraci rozvodu elektrické energie např. při změnách technologie. Rozvodný systém se vyrábí pro různé druhy prostředí a je složen ze skříňového rozváděče, na který jsou připojeny jednotlivé dílce (přímé, úhlové, odbočné). Z přípojnicových dílců jsou dále napájeny jednotlivé odbočky ke strojům, obvykle kabelem nebo šňůrou. [5]

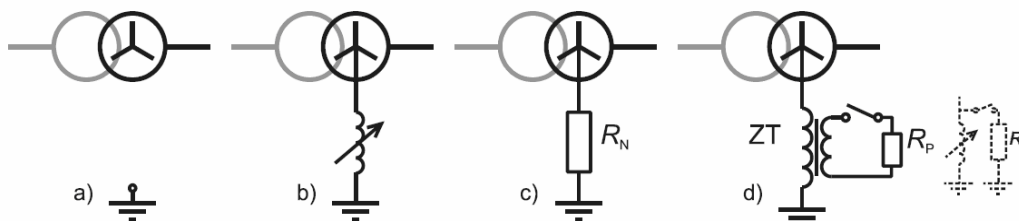
2.1.8 Zásady pro zajišťování dodávky elektrické energie

Podle důležitosti napájení technologických zařízení a rozveden jsou dodávky elektrické energie rozděleny do tří stupňů:

1. Dodávky 1. stupně musí být zajištěny za každých okolností, neboť jejich přerušení může způsobit velké hospodářské ztráty nebo ohrožení lidských životů. Napájení je vyžadováno ze dvou nezávislých zdrojů o dostatečném výkonu, aby při vypadnutí jednoho zdroje byla plně zajištěna dodávka. Náhradní napájecí zdroj může být vlastní generátor, dva nezávislé rozvody k rozvaděčům (okružní rozvod), napájecí rozvodna s více přípojnicovými systémy nebo přípojnice jednosystémové podélně dělené s několika přívody.
2. Dodávky 2. stupně mají být zajištěny, jelikož jejich přerušení znamená zmenšení rozsahu nebo zastavení výroby. V tomto případě za dostatečnou zálohu považujeme připojení na dva transformátory, dvě skupiny transformátorů nebo zapojení přívodů k podružným rozvaděčům jako průběžné.
3. Dodávka 3. stupně nevyžadují žádné zvláštní zajištění. [7]

2.2 Způsoby provozu uzlu transformátoru

Každá varianta uzemnění je vhodná pro jiný provoz lokálních distribučních soustav. Většina distribučních soustav je provozována jako kompenzovaná s variantou připínání odporníku na sekundární straně zhášecí tlumivky. V průmyslových a elektrárenských provozech lze nalézt různé varianty tohoto uzemnění, např. důlní sítě jsou provozovány jako izolované, přičemž podle nové legislativy se přechází na sítě kompenzované. [6]



Obr. 2.10: Způsoby provozu uzlu transformátoru [6]

2.2.1 Síť izolované

U izolovaných sítí není nulový bod transformátoru spojen se zemnicí soustavou, je izolován. Kapacity jednotlivých fází vedení nepoškozené sítě proti zemi i svodové odpory jsou přibližně symetrické a při napájení symetrickým zdrojem jsou fázová napětí proti zemi stejně velká. Uzel proti zemi má téměř nulové napětí. Taktéž proudy síťových kapacit proti zemi dosahují stejných hodnot.

Tyto sítě jsou nejčastěji provozovány u malých distribučních a průmyslových rozvodů, jejichž celková hodnota kapacitního proudu nepřesáhne 20 A. Při poruše se symetrie zruší a celkový kapacitní proud soustavy je dán součtem kapacitních proudů nepostižených fází celé sítě, které se uzavírají přes

místo zemního spojení. V případě, že dojde k překročení hodnoty 20 A kapacitního proudu, je nutné provést kompenzaci. [13]

2.2.2 Síť kompenzované

Kompenzované sítě jsou charakteristické tím, že jejich uzel transformátoru je spojen se zemí přes zhášecí tlumivky nebo u nichž je vytvořen umělý nulový bod pomocí zhášecích transformátorů. Zhášecí tlumivka kompenzuje kapacitní proud zemního spojení tak, že místem poruchy prochází pouze zbytkový proud činného charakteru velikosti 3 % - 10 % celkového kapacitního proudu. V našich distribučních sítích se využívá hlavně centralizovaná kompenzace, s využitím jedné zhášecí tlumivky zapojené mezi uzel transformátoru a zemnicí soustavou. Velikost tlumivky je řízena automatikou a to tak, aby byla tlumivka v paralelní rezonanci s celkovou kapacitou sítě. [13]

2.2.3 Síť uzemněné

Tento druh sítě je charakterizován přímým spojením nulového bodu transformátoru se zemí nebo přes malou impedanci. V naší zemi jsou nulové body transformátoru uzemněny přímo. Napětí uzlu vinutí je proti zemi téměř nulové a napětí fází dosahuje proti zemi fázových hodnot. U některých transformátorů v síti 110 kV lze výjimečně odpojit nulový bod pro snížení velikosti jednofázových zkratových proudů. [12]

2.3 Rušivé jevy v průmyslových sítích

Průmyslové sítě musí zásobovat elektrickou energií dané spotřebiče s definovanými kvalitativními parametry elektrické energie. Tyto parametry jsou ovlivňovány způsobem její spotřeby, především výskytem nelineárních spotřebičů, které generují vyšší harmonické a dochází ke zkreslování napájecího napětí. Dále jsou to spotřebiče vykazující velké změny v odběru jalového a činného výkonu, čímž způsobují kolísání napětí.

Mezi jevy způsobující zhoršení kvality elektrické energie patří:

- Nesymetrie napětí,
- kolísání napětí,
- krátkodobé přerušení napětí,
- vyšší harmonické,
- přepětí. [4]

2.3.1 Nesymetrie napětí

Je to stav třífázové sítě, kdy velikosti fázových napětí nebo úhly po sobě jdoucími fázory napětí nejsou stejné. Rozlišujeme:

1. nesymetrická soustava nevyvážená – součet fázorů napětí je různý od nuly.
2. nesymetrická soustava vyvážená – součet fázorů napětí je nulový.

Nesymetrie napětí je dán stupněm nesymetrie, poměrem zpětné složky k sousledné složce napětí. V distribučních sítích je přípustná hodnota nesymetrie uváděna $u_2 = 2 \%$.

$$u_2 = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (\%; V; V) \quad (2.1)$$

Napětíová nesymetrie je způsobena nerovnoměrným zatížením fází trojfázové sítě. Převážně se jedná o jednofázové pece, napájení střídavé trakce. Mezi negativní účinky nesymetrie patří: snížení provozního využití vedení a transformátorů, zvýšené oteplení elektrických točivých strojů vlivem přídatných ztrát, ovlivnění funkce regulačních a řídicích zařízení. Proto je nutné vhodně rozložit jednofázové zátěže do všech fází nebo u elektrických pecí využít symetrizačního zapojení. [4]

2.3.2 Kolísání napětí

O kolísání hovoříme tehdy, dochází-li k rychlým změnám napětí těsně jdoucích za sebou nebo pokud se jedná o rychlé periodické změny. Kolísání je způsobeno časově proměnlivou zátěží, kdy frekvence změn je menší než frekvence sítě. Napětí se pohybuje v intervalu $\pm 10 \% U_n$. Kolísání napětí je nutné rozlišovat od odchylek napětí, které jsou klasifikovány jako pomalé změny napětí o délce trvání několik period způsobených zapnutím velkých spotřebičů. Rovněž pohybující se v rozmezí $\pm 10 \% U_n$.

U trojfázové symetrické zátěže jsou relativní změny sdružených napětí shodné se změnami fázových napětí a odpovídají přibližně změně výkonu zátěže ΔS_A vztažené zkratovému výkonu v místě připojení S_{KV} .

$$d = \frac{\Delta U}{U_n} = \frac{\Delta U_f}{U_{nf}} \cong \frac{\Delta S_A}{S_{KV}} \quad (-; V; V) \text{ nebo } (-; VA; VA) \quad (2.2)$$

Nejnepříznivějším jevem vyvolaným v důsledku kolísání napětí je flickr. Flickr je definován jako změna zrakového vnímání způsobená časovou změnou světelného toku svítidel. Jelikož lidské oko reaguje na flickr velmi citlivě musí se napětíové změny pohybovat v úzkých mezích. Reakce lidského oka nastává již při 18 změnách za sekundu, což odpovídá napětíové změně 0,3 %. Negativně mohou být ovlivněny některé spotřebiče např. počítače, televizory.

Zdroje způsobující kolísání napětí jsou odporové, obloukové svářečky, periodicky opakovaný rozběh motorů, elektrické obloukové pece. Kolísání napětí lze omezit zvětšením zkratového výkonu, přepojením na vyšší hladinu napětí, u motorů použití kotvy s nižším rozběhovým proudem případně použití spouštěče či setrvačnicku. [4]

2.3.3 Vyšší harmonické

Vyšší harmonické jsou generovány nelineárními spotřebiči odebírající při sinusovém napětí nesinusový proud. Pokud je frekvence sinusové složky shodná s frekvencí nesinusové funkce hovoříme o základní harmonické. Vyšší harmonická je definována jako sinusová funkce, jejíž frekvence je násobkem základní harmonické.

Nelineární spotřebiče lze považovat za proudové zdroje vyšších harmonických. Harmonické proudy tekoucí od rušícího zařízení do sítě vyvolávají na impedanci sítě úbytky napětí daného řádu

harmonické. Tyto úbytky se superponují na sinusový průběh napětí a dochází k deformaci síťového napětí.

Hodnocení obsahu vyšších harmonických v napájecím napětí je prováděno pomocí celkového činitele zkreslení (Total Harmonic Distortion), který obsahuje všechny harmonické až do řádu 40, musí být menší nebo roven 8 %:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} u_h^2} \cdot 100 \quad (\%; -), \quad (2.3)$$

kde

h řád harmonické,

u_h relativní amplituda h -té harmonické vztažené k základní.

Míra deformace napájecího napětí je dána vnitřní impedancí soustavy v místě připojení nelineárních spotřebičů k síti. Při základní frekvenci 50 Hz má impedance sítě převážně induktivní charakter, pro některé harmonické frekvence mohou nabývat i kapacitního charakteru. Jelikož síť zahrnuje prvky kapacitního i induktivního charakteru může docházet k rezonančním jevům v síti a tím i k proudovému přetěžování prvků sítě.

Mezi největší zdroje harmonických patří:

1. Zařízení výkonové elektroniky (usměrňovače, frekvenční měniče, výkonové měniče napětí), generující převážně liché řady harmonických 5., 7., 11., 13.
2. Elektronická zařízení jako jsou televizory, úsporná svítidla s elektrickým předřadníkem, mikrovlnné trouby.
3. Přesycené indukčnosti.
4. Obloukové pece v důsledku nelinearity elektrického oblouku.

Provoz rozvodné sítě i zařízení odběratelů je nepříznivě ovlivňováno přítomností vyšších harmonických především těmito negativními účinky:

1. Chyby při měření energie.
2. Ovlivňování HDO.
3. Nesprávná funkce elektrických ochran.
4. Zkrácení životnosti motorů, transformátorů, kondenzátorů vlivem tepelného přetěžování.
5. Přídavné ztráty v síti a tím pádem dochází ke zhoršení účinnosti přenosu elektrické energie, zhoršení účinníku napájecí sítě.
6. Ovlivňování zhášení zemních spojení. [4]

Tab. 2-1: Úrovně harmonických napětí ve společném napájecím bodě [4]

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Ne násobky 3		Násobky 3			
Řád harmonické h	Harmonická napětí %	Řád harmonické h	Harmonická napětí %	Řád harmonické h	Harmonická napětí %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25					
POZNÁMKA: Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně zjistitelné.					

2.3.3.1 Opatření pro omezení harmonických

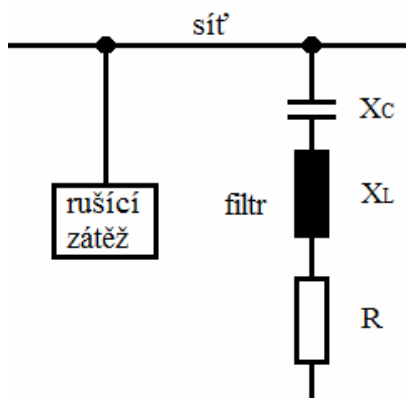
Povinností odběratele elektrické energie je zařídit, aby harmonické rušení způsobené provozem zařízení nepřekračovala hodnotu celkového rušení v dané síti podle tab. 2-1. Lze to zajistit následujícími způsoby:

1. Vhodné zapojení napájecího transformátoru.

Průniku 3. harmonické lze zamezit zapojením transformátoru D/y.

2. Pasivní filtry

Pasivní filtr je nastaven na rezonanční frekvenci některé harmonické. Pro danou harmonickou filtr představuje zkrat, jelikož má přibližně nulovou impedanci a harmonické proudy tekoucí z rušícího zařízení do filtru téměř neproniknou do sítě. Filtr je schopen potlačovat rezonanční jevy na frekvencích $f > f_r$, při nižších frekvencích než f_r má kapacitní charakter a může vytvořit s reaktancí sítě paralelní rezonanční obvod. Jednotlivé filtry naladěné na různé frekvence lze paralelně spojit do skupin, ale je nutné, aby se při připojování filtrů postupovalo od filtrů na nejnižší frekvence, neboť by opět mohlo dojít k paralelní rezonanci.

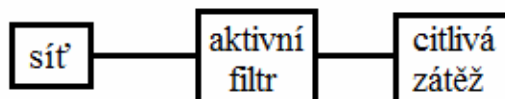


Obr. 2.11: Připojení pasivního paralelního filtru [4]

3. Aktivní filtry

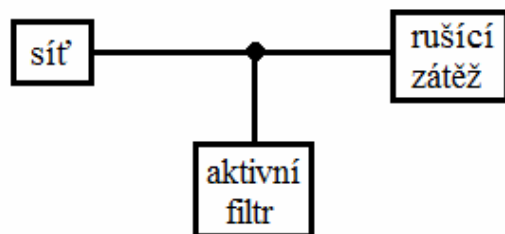
Nevýhodou pasivních filtrů je to, že odstraňují pouze vyšší harmonické, na které byly navrženy. Není tedy možné dosáhnout pružného přizpůsobení jiným než dříve zvoleným podmínkám. Aktivní filtry lze představit jako generátory řízené řídicím systémem tak, aby byla dosažena kompenzace harmonických složek.

Aktivní filtr sériově zapojený mezi sít a zátěž umožňuje kompenzovat průběh napětí na svorkách zátěže na požadovaný sinusový průběh. Jedná se o generátor napětí, který generuje harmonická napětí v protifázi oproti síťovým harmonickým napětím. Tato napětí jsou navzájem vyrušena a sít se jeví, jakoby harmonická napětí neobsahovala.



Obr. 2.12: Aktivní filtr sériově zapojený [4]

Paralelní aktivní filtr je reprezentován řízeným generátorem proudu, vytvářející harmonické proudy, které jsou injektovány do sítě ovšem v protifázi se složkami proudu rušící zátěže. Opět dochází k vyrušení těchto složek a zátěž se chová, jakoby negenerovala harmonické proudy. Do sítě mohou téct zbytkové harmonické proudy v tolerované hranici. [4]



Obr. 2.13: Aktivní filtr paralelně zapojený [4]

3. TEORETICKÝ ROZBOR VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ

Výpočet zkratových poměrů v průmyslových a distribučních sítích je nezbytný z těchto důvodů:

- Pro dimenzování elektrického vedení a přípojníc na zkratový proud.
- Pro volbu elektrických přístrojů.
- Pro nastavení ochran, jež zkraty vypínají.

Zkraty jsou nejrozšířenějšími poruchami jak v přenosové elektrizační soustavě tak i distribuční. Zkrat je definován jako náhodné nebo úmyslné spojení mezi dvěma nebo více obvody, respektive vodivé spojení dvou nebo tří fází vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule. V soustavách s uzemněným uzlem zdroje také spojení jedné nebo dvou fází se zemí. Při zkratu protékají obvodem zkratové proudy do místa vzniku zkratu, které jsou několikanásobně větší než provozní proudy.

S růstem spotřeby elektrické energie a se stálým zvětšováním rozsahu elektrických sítí všech napětí se zvětšují i zkratové proudy. Vývoj zkratových proudů následně ovlivňuje parametry rozvodných soustav i konstrukci elektrických zařízení. Pro správné dimenzování je nutné znát nejen velikost, ale i časový průběh zkratového proudu. [6]

3.1 Názvosloví a charakteristika zkratových veličin podle ČSN EN 60609-0

Zkratový proud – nadproud, který vznikl v důsledku zkratu v elektrické soustavě.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' - efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Stojnosměrná složka zkratového proudu $i_{d.c.}$ - střední hodnota horní a spodní obálkové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p - maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

Ustálený zkratový proud I_k - efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodového jevu.

Souměrný zkratový proud – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou aperiodickou složkou proudu.

Souměrný zkratový vypínací proud I_b - efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

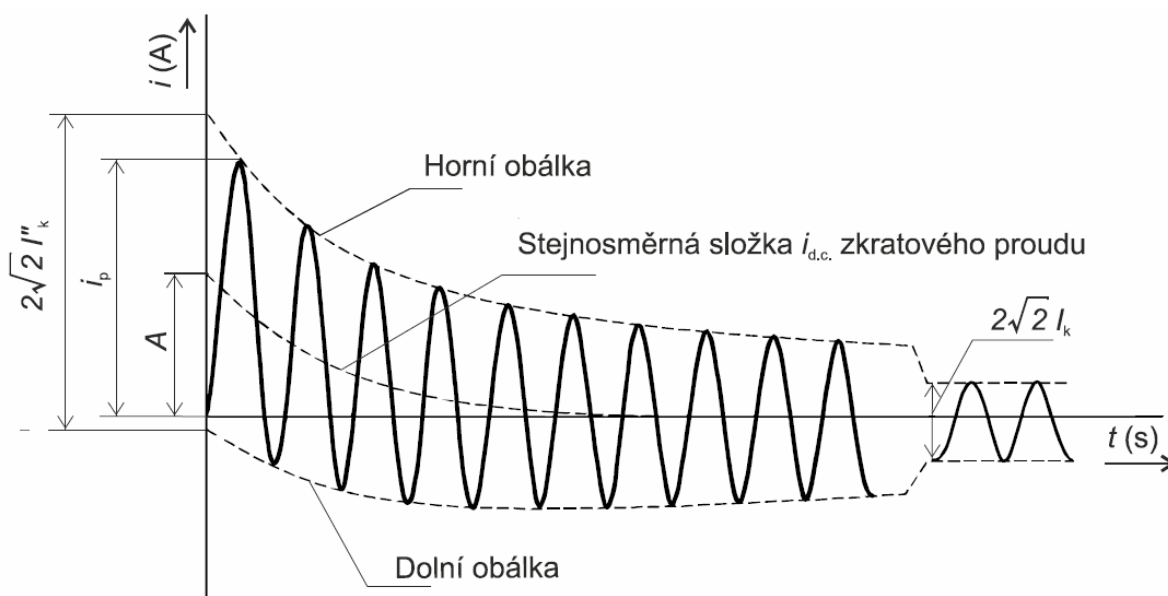
Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} - efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

Elektricky vzdálený zkrat – zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.

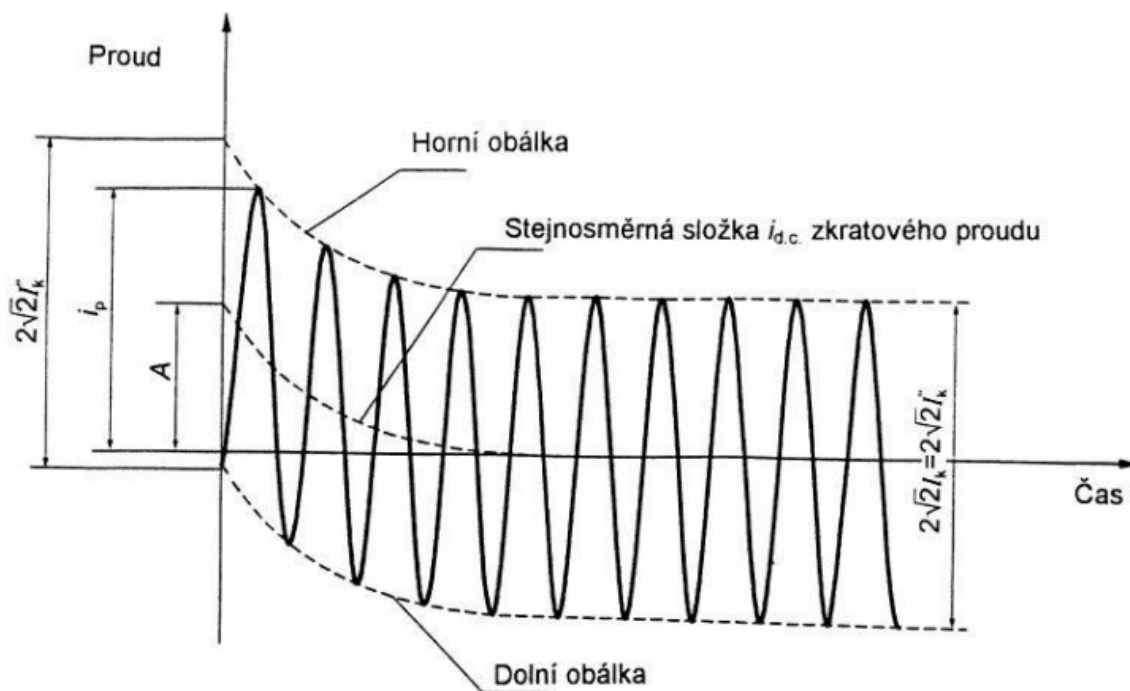
Elektricky blízký zkrat – zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu bez motorů. [11]

3.2 Průběh zkratových proudů

Vlivem náhlé změny impedance při zkratu vzniká ve všech prvcích elektrizační soustavy přechodový děj. Protože se energie magnetického pole v těchto člancích nemůže měnit skokově, má zkratový proud v závislosti na čase neharmonický průběh. Maximální hodnoty zkratový proud dosahuje v prvních okamžicích po vzniku zkratu. Velikost nárazového zkratového proudu závisí na časové konstantě zanikající aperiodické složky a na klesající souměrné střídavé složce. S určitou přibližností lze říct, že maximální hodnoty i_p je dosaženo v okamžiku, kdy napětí prochází nulou.



Obr. 3.1: Zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou [11]



Obr. 3.2: Zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou [11]

3.3 Zjednodušující předpoklady výpočtu zkratových proudů

- 1) Typ zkratu je po celou dobu trvání zkratového proudu nezměněn.
- 2) Odpor oblouku se neuvažují.
- 3) Impedance transformátorů jsou uvažovány pro přepínače v základní poloze. To je přípustné, jelikož je uveden korekční součinitel pro impedance K_T pro síťové transformátory.
- 4) Paralelní admitance, kapacity vedení a netočivé složky zátěže jsou zanedbány kromě paralelních admitancí v netočivé soustavě.
- 5) Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.

Výpočty provedené pomocí těchto předpokladů pro uvažované elektrické soustavy zajišťují dostatečnou přesnost výsledků, i když zcela přesně neodpovídají dané skutečnosti.

Pokud jsou počítány zkratové proudy v soustavách s odlišnými hladinami napětí, je nezbytně nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na druhou. Obvykle přepočítáváme na napěťovou hladinu, ve které se má vypočítat zkratový proud. [11]

3.4 Metoda výpočtu ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu

Metoda je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, jedná se o jediný aktivní napěťový zdroj. Všechny ostatní napáječe, asynchronní a synchronní stroje jsou při

výpočtu nahrazovány svou vnitřní impedancí. Např. nadřazená soustava, transformátor je nahrazen vnitřní impedancí přepočtenou na stranu nižšího napětí transformátorů. Údaje o poloze přepínače odboček transformátorů, o odběrech, buzení generátorů nejsou potřebné, odpadá i nutnost provádění výpočtu toků v různých stavech před zkratem. Velikost ekvivalentního napětového zdroje je dána:

$$E = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (\text{V}; -; \text{V}) \quad (3.1)$$

Kde c je napětový koeficient, který zohledňuje kolísání napětí v závislosti na čase a místě, přepínání odboček transformátoru, chování generátorů a motorů při přechodovém ději, zanedbání zátěže a kapacitních reaktancí při výpočtu. Hodnoty napětového koeficientu jsou uvedeny v ČSN EN 60609. [11]

Tab. 3-1: Napětový koeficient c

Jmenovité napětí U_n	Napětový součinitel c pro výpočet	
	Maximálních zkratových proudů $c_{max}^{1)}$	Minimálních zkratových proudů c_{min}
Nízké napětí 100 V až 1000V	1,05 ³⁾ 1,1 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV	1,1	1
Velmi vysoké napětí²⁾ > 35 kV		

¹⁾ $c_{max} U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.
²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{max} U_n = U_m$ nebo $c_{min} U_n = 0,9 U_m$.
³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí + 6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V.
⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí + 10 %.

3.5 Podmínky výpočtu maximálních zkratových proudů

- Pro výpočet se musí použít napětový součinitel c_{max} .
- Zvolit konfiguraci soustavy a maximální příspěvky ze síťových napáječů, elektráren vedoucí k maximální hodnotě zkratového proudu místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu.
- Rezistance vedení R_L je uvažována při teplotě 20 °C.
- Motory musí být zahrnuty.

- Pokud je použita ekvivalentní impedance Z_Q reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů. [11]

3.6 Podmínky výpočtu minimálních zkratových proudů

- Pro výpočet se musí použít napěťový součinitel c_{min} .
- Motory se zanedbávají.
- Rezistance vedení R_L je uvažována při maximální dovolené provozní teplotě.
- Zvolit konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů vedoucí k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu. [11]

3.7 Zkratová impedance elektrických zařízení

Pro výpočet zkratového proudu potřebujeme znát impedanci zkratového obvodu. Tato výsledná hodnota se zjistí postupným zjednodušováním náhradního schématu. U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobných zařízení jsou zkratové impedance sousledné a zpětné rovny $Z_{(1)} = Z_{(2)}$. Netočivá impedance $Z_{(0)}$ je určena ze střídavého napětí, které je uvažováno mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (například zemí, nulovým vodičem, kabelovým pancířem). Společným zpětným vedením protéká trojnásobek proudu netočivé složky. Impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků je nutné vynásobit imedančními korekčními činiteli (K_G , K_T , K_S), pokud je výpočet proveden pomocí ekvivalentního napěťového zdroje. [11]

3.7.1 Síťové napáječe

Jestliže je trojfázový zkrat napájen ze sítě, u které je znám pouze souměrný rázový zkratový proud I''_{kQ} v místě připojení napáječe Q, pak sousledná zkratová impedance sítě v Q je dána podle vztahu:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (\Omega; -; V; A) \quad (3.2)$$

Je-li znám R_Q / X_Q , lze určit X_Q následovně:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q / X_Q)^2}} \quad (\Omega; \Omega; \Omega; \Omega) \quad (3.3)$$

Pokud je zkrat napájen transformátorem ze sítě zvn, vvn nebo vn, kde je znám pouze počáteční souměrný zkratový proud I''_{kQ} v místě připojení napáječe Q, lze souměrnou ekvivalentní zkratovou impedanci Z_{Qr} vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím stanovit jako:

$$Z_{Ql} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (\Omega; -; V; A; -), \quad (3.4)$$

kde

U_{nQ} jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q,

I_{kQ}'' počáteční rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q,

c napěťový součinitel (podle tab.: 3-1),

t_r jmenovitý převod transformátoru při zapojení přepínače odboček v základní poloze.

V případě napáječů se jmenovitým napětím nad 35 kV, které jsou napájeny z venkovních vedení lze impedanci Z_Q považovat za reaktanci $Z_Q = jX_Q$. Pokud není rezistance R_Q známa, je možné dosadit $R_Q = 0,1X_Q$, $X_Q = 0,995Z_Q$.

Pokud počáteční souměrné rázové zkratové proudy na straně vyššího napětí transformátoru neudá provozovatel přenosové soustavy, musí se určit výpočtním postupem podle [11].

3.7.2 Dvouvinut'ové transformátory

Souslednou impedanci dvouvinut'ových transformátorů $\underline{Z} = R_T + jX_T$ s regulovanými odbočkami nebo bez nich lze určit z následujícího vztahu:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (\Omega; \%; V; VA) \quad (3.5)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (\Omega; \%; V; VA) \text{ nebo } (\Omega; W; A) \quad (3.6)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (\Omega; \Omega; \Omega), \quad (3.7)$$

kde

U_{rT} jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí,

I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí,

S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru,

P_{krT} jmenovité ztráty transformátoru nakrátko,

u_{kr} jmenovité napětí nakrátko v procentech,

u_{Rr} činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech.

Hodnota u_{Rr} se určí ze ztrát nakrátko P_{krT} ve vinutí při I_{rT} . Poměr R_T/X_T roste s velikostí transformátoru. U velkých transformátorů při výpočtu zkratového proudu lze uvažovat pouze reaktanci. Odpor se musí uvažovat pouze při výpočtu nárazového zkratového proudu i_p nebo stejnosměrné složky $i_{d.c.}$. Údaje potřebné pro výpočet a údaje k netočivé zkratové impedanci lze získat od výrobce nebo na štítku.

U dvouvinut'ových transformátorů je nutné k impedancím zavést korekční součinitel K_T : $\underline{Z}_{TK} = K_T \cdot \underline{Z}_T$, kde $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$.

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (-; -; -), \quad (3.8)$$

kde x_T je poměrná reaktance transformátoru:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} \quad (-; \Omega; \text{V}; \text{VA}) \quad (3.9)$$

Korekční součinitel neplatí pro blokové transformátory. Korekční součinitel je nutné použít u zpětných a netočivých impedancí transformátoru. [11]

3.7.3 Venkovní vedení a kabely

Souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ lze určit z parametrů vodiče (průřezu a rozteče vodičů).

Činnou rezistanci na jednotku délky R'_L venkovních vedení při teplotě vodiče 20 °C lze vypočítat ze jmenovitého průřezu q_n a rezistivity ρ :

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (\Omega \cdot \text{m}^{-1}; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}; \text{mm}^2), \quad (3.10)$$

kde

$$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{pro měď},$$

$$\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{pro hliník}.$$

Reaktanci X'_L na jednotku délky je možné určit, když je provedena transpozice vedení, ze vztahu:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (\Omega \cdot \text{m}^{-1}; \text{Hz}; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}; \text{m}; \text{m}), \quad (3.11)$$

kde

d geometrická střední vzdálenost mezi vodiči nebo středem svazku
 $d = \sqrt[3]{d_{L1L2} \cdot d_{L2L3} \cdot d_{L3L1}},$

r poloměr jednoduchého vodiče, u svazkových vodičů se za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$, kde R je poloměr svazku,

n počet vodičů ve svazku,

μ_0 permeabilita vakua, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. [11]

Pokud výrobce udává činný odpor a reaktanci kabelu na jednotku délky lze použít vztah:

$$X_k = X_K \cdot l \quad (\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{km}) \quad (3.12)$$

$$R_k = R_K \cdot l \quad (\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{km}) \quad (3.13)$$

3.7.4 Synchronní generátory

Při řešení počátečních souměrných rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátoru bez blokových transformátorů, (v průmyslových nebo nízkonapěťových sítích), je nutné použít v sousledné složkové soustavě následující impedanci:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jX_d'') \quad (\Omega; -; \Omega; \Omega),$$

$$\text{korekční součinitel } K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (-; V; -; V; -), \quad (3.14)$$

kde

U_n jmenovité napětí soustavy,

U_{rG} jmenovité napětí generátoru,

\underline{Z}_{GK} korigovaná impedance generátoru,

\underline{Z}_G rázová impedance generátoru v sousledné soustavě $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$,

$\sin \varphi_{rG}$ fázový úhle mezi I_{rG} a $\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}}$,

x_d'' poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci $x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}}$,

$$Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}.$$

Za fiktivní rezistance R_{Gf} lze s dostatečnou přesností použít následující hodnoty:

$R_{Gf} = 0,05 X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ a $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$,

$R_{Gf} = 0,07 X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ a $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$,

$R_{Gf} = 0,15 X_d''$ pro generátory s $U_{rG} \leq 1 \text{ kV}$.

Tyto hodnoty se mohou použít pro výpočet nárazového zkratového proudu, pro výpočet aperiodické složky zkratového proudu se použít nesmí. Synchronní motory a kompenzátory jsou pro výpočet nárazového zkratového proudu i_p , ustáleného zkratového proudu I_k a počátečního rázového zkratového proudu I_k'' modelovány stejným způsobem. [11]

S dostatečnou přesností lze použít vztah:

$$X_G = \frac{x_d'' \cdot U_{rG}^2}{100 \cdot S_{rG}} \quad (\Omega; \% ; V; VA) \quad (3.15)$$

kde

x_d'' nárazová reaktance generátoru,

S_{rG} jmenovitý výkon generátoru.

3.7.5 Asynchronní motor

Motory nízkého a vysokého napětí přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I_k'' , nárazovému zkratovému proudu i_p , souměrnému vypínacímu proudu I_b , u nesouměrných zkratů k ustálenému zkratovému proudu I_k . Při výpočtu zkratových proudů je možné zanedbat ty motory nízkého a vysokého napětí, které s ohledem na schéma zapojení nebo funkci nejsou zároveň v provozu.

Impedance $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ v sousledné a zpětné soustavě lze určit pomocí:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (\Omega; V; A; A; A) \text{ nebo } (\Omega; V; A; A; VA), \quad (3.16)$$

kde

U_{rM} jmenovité napětí motoru,

I_{rM} jmenovitý proud motoru,

S_{rM} jmenovitý zdánlivý příkon motoru,

$\frac{I_{LR}}{I_{LM}}$ poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru.

Při výpočtu počátečních rázových zkrat proudů se mohou asynchronní motory nahradit jejich impedancemi podle výše uvedeného vztahu u sousledné a zpětné soustavy.

Pokud je znám $\frac{R_M}{X_M}$, pak X_M lze určit následujícím vztahem:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_M}{X_M}\right)^2}} \quad (\Omega; \Omega; \Omega; \Omega) \quad (3.17)$$

S dostatečnou přesností je možné použít následující vztahy:

$\frac{R_M}{X_M} = 0,10$, s $X_M = 0,995 \cdot Z_M$ pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $\geq 1\text{MW}$,

$\frac{R_M}{X_M} = 0,15$, s $X_M = 0,989 \cdot Z_M$ pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $< 1\text{MW}$,

$\frac{R_M}{X_M} = 0,42$, s $X_M = 0,922 \cdot Z_M$ pro skupiny nízkonapěťových motorů včetně připojovacích kabelů. [11]

3.7.6 Vztahy pro výpočet zkratových proudů ve fyzikálních jednotkách

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{k3}'' pro trojfázový zkrat:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (A; -; V; \Omega) \quad (3.18)$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{k2}'' pro dvojfázový zkrat:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2|Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3}'' \quad (A; -; V; \Omega) \quad (3.19)$$

V počáteční době zkratu je zpětná impedance přibližně rovna sousledné nezávisle zda se jedná blízký nebo vzdálený zkrat.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{k1}'' pro jednofázový zkrat:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad (A; -; V; \Omega; \Omega; \Omega) \quad (3.20)$$

Pro elektricky vzdálený zkrat platí $Z_{(1)} = Z_{(2)}$, tedy:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|2Z_{(1)} + Z_{(0)}|} \quad (A; -; V; \Omega; \Omega), \quad (3.21)$$

kde

U_n jmenovité napětí soustavy v místě zkratu,

$Z_{(1)}$ výsledná sousledná impedance zkratového obvodu,

$Z_{(2)}$ výsledná zpětná impedance zkratového obvodu,

$Z_{(0)}$ výsledná netočivá impedance zkratového obvodu. [11]

4. POPIS PROVOZNÍCH VARIANT V SÍTI PRŮMYSLOVÉHO PODNIKU

Z hlediska způsobu provozu soustavy jsou uvažovány čtyři následující varianty. Všechny varianty jsou napájeny z vvn soustavy 110 kV ČEZ Distribuce a. s. z linky 619 – Lískovec. Transformátory T1/R100, T2/R100, T4/R100 a T5/R100 transformují napětí 110 kV na 6 kV. Schémata zapojení jsou vloženy do přílohy. Generátor zobrazený ve schématech na rozvodně R6 při výpočtu nebyl uvažován, jelikož není a nikdy nebude v provozu.

Tab. 4-1: Umístění jednotlivých zařízení

Zařízení	Označení	Umístění
Asynchronní motory	M1/R12	R12
	M1/R16	R16
	M31	R24
	M41	R24
Synchronní motory	1DAP	R4
	2DAP	R4
Synchronní kompenzátory	G1/R3	R3
	G1/R13	R13

4.1 Provozování vn rozvoden varianta č. 1 – klasický provoz

Transformátor T1/R100, který by měl napájet rozvodnu R2 je odpojen. Jeho funkci zastupuje transformátor T2/R100, jelikož systém přípojníc A rozvoden R3 a R2 je sepnut podélným spínačem přípojníc.

Z rozvodny R3 a R2 jsou napájeny kabelovým vedením následující rozvodny a zařízení:

- synchronní kompenzátor G1/R3,
- asynchronní motor M1/R12 na rozvodně R12,
- rozvodny R8, R9, R11,
- rozvodna R23, navazující na rozvodnu R1 a dále z R1 jsou napájeny rozvodny R17, R21, R22,
- asynchronní motory M31 a M41 na R24 přes rozvodny R5 a R6.

Transformátor T4/R100 je připojen na rozvodnu R4, jejíž přípojnice A je spojena s přípojnící B rozvodny R13. Tento rozvod dále napájí:

- synchronní motory 1DAP, 2DAP na rozvodně R4,

- rozvodnu R16 s asynchronním motorem M1/R16,
- rozvodnu R14.

Rozvodna R13 přípojnice A je napájena z transformátoru T5/R100. K této rozvodně je připojen synchronní kompenzátor G1/R13 a rozvodna R19.

4.2 Provozování vn rozvoden varianta č. 2

V provozní variantě č. 2 je transformátor T2/R100 odpojen jeho funkci přebíral transformátor T1/R100. Systém přípojníc R2 a R3 je sepnul podélným spínačem přípojníc.

Rozvodny R2 a R3 zásobují elektrickou energií následující rozvodny a zařízení:

- synchronní kompenzátor G1/R3,
- asynchronní motor M1/R12 na rozvodně R12,
- asynchronní motor M1/R16 na rozvodně R16,
- rozvodny R8, R9, R11,
- rozvodnu R6, z R6 jednou větví jsou napájeny motory M31, M41 na rozvodně R24 přes rozvodnu R5. Druhá větev zásobuje rozvodny R17, R21, R22, R23 přes R1.

I v této provozní variantě je přípojnice A rozvodny R4 propojena s rozvodnou R13 přípojnící B. Na tento systém jsou připojeny:

- synchronní motory 1DAP, 2DAP,
- rozvodna R14.

Stejně jako ve výše uvedené variantě rozvodna R13 přípojnice A napájí rozvodnu R19 a synchronní kompenzátor G1/R13.

4.3 Provozování vn rozvoden varianta č. 3

Opět je odpojen transformátor T2/R100. Na rozvodny R2, R3 navazuje:

- synchronní kompenzátor kompenzátor G1/R3,
- rozvodna R8.

Rozvodna R4 přípojnice A, které je propojena s rozvodnou R 13 přípojnící B napájí:

- synchronní motory 1DAP a 2DAP,
- asynchronní motor M1/R12 na R12,
- asynchronní motor M1/R16 na R16,
- rozvodnu R9, R11, R14,
- rozvodnu R5, z níž pak jedna větev napájí asynchronní motory M31 a M41 na R24. Druhá větev propojuje rozvodnu R6 s rozvodnou R1 a následně R17, R21, R22 a R23.

K rozvodně R13 přípojnici A je připojen:

- synchronní kompenzátor G1/R13,
- rozvodna R19.

4.4 Provozování vn rozvoden varianta č. 4

Průmyslový podnik se napájí pouze dvěma transformátory T2/R100 a T5/R100. Systém přípojníc A na rozvodnách R2 a R3 je jako ve všech předchozích variantách spojen. Přípojnice A rozvodny R3 je sériově spojena s přípojnící A na rozvodně R4 a přípojnící B rozvodny R13, neboť transformátor T4/R100 je odpojen.

Hlavní rozvodny R2, R3 dále napájí:

- synchronní kompenzátor G1/R3,
- rozvodnu R12 s asynchronním motorem M1/R12,
- rozvodnu R16 s asynchronním motorem M1/R16,
- rozvodny R8, R9, R11,
- rozvodnu R6, jedna větev napájí asynchronní motory M31 a M41 na rozvodně R24 přes R5. Druhá větev propojuje R1 navazující zbylé rozvodny R17, R21, R22, a R23.

Propojení rozvoden R4 a R13 je shodné s provozním zapojením č. 2.

5. VÝPOČET MAXIMÁLNÍCH A MINIMÁLNÍCH ZKRATOVÝCH POMĚRŮ NA ROZVODNÁCH VN

U všech náhradních prvků je počítáno pouze s reaktancemi, jen u kabelů uvažujeme i jejich rezistanci. Zkratové poměry R110 kV Lískovec sítě ČEZ Distribuce a. s. jsou uvedeny v tab. 5-1.

Tab. 5-1: Zkratové poměry R110 kV Lískovec

Rozvodna	S_{ks3}	I_{ks3}''	S_{ksI}	I_{ksI}''
R110 kV Lískovec	(MVA)	(kA)	(MVA)	(kA)
Maximální	3427,6	17,99	3026,5	15,89
Minimální	1288,9	6,76	1079,8	5,67

5.1 Výpočet náhradních prvků průmyslové sítě

Reaktance nadřazené soustavy 110 kV pro maximální zkratový proud:

$$X'_{Q_{\max}} = Z'_{Q_{\max}} = \frac{c_{\max} \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ_{\max}}''} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 17,99} = 3,8832 \, \Omega$$

Přepočtená reaktance na hladinu 6 kV:

$$X_{Q_{\max}} = Z_{Q_{\max}} = Z'_Q \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = 3,8832 \cdot \left(\frac{6}{110} \right)^2 = 0,0116 \, \Omega$$

Reaktance nadřazené soustavy 110 kV pro minimální zkratový proud:

$$X'_{Q_{\min}} = Z'_{Q_{\min}} = \frac{c_{\min} \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ_{\min}}''} = \frac{1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 6,76} = 9,3948 \, \Omega$$

Přepočtená reaktance na hladinu 6 kV:

$$X_{Q_{\min}} = Z_{Q_{\min}} = Z'_Q \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = 9,3948 \cdot \left(\frac{6}{110} \right)^2 = 0,028 \, \Omega$$

Reaktance dvouvinutových transformátorů:

$$\mathbf{T1/R100:} \quad X_{T1/R100} = Z_{T1/R100} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{11,15}{100} \cdot \frac{6^2}{16} = 0,2509 \, \Omega$$

$$x_{T1} = \frac{X_{T1}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{0,2509}{\frac{6^2}{16}} = 0,1115$$

$$K_{T1} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T1}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,1115} = 0,9795$$

$$X_{TK1/R100} = K_{T1} \cdot X_{T1/R100} = 0,9795 \cdot 0,2509 = 0,2458 \Omega$$

$$\mathbf{T2/R100:} \quad X_{T2/R100} = Z_{T2/R100} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{11,05}{100} \cdot \frac{6^2}{16} = 0,2486 \Omega$$

$$x_{T2} = \frac{X_{T2}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{0,2486}{\frac{6^2}{16}} = 0,1105, \quad K_{T2} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T2}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,1105} = 0,98$$

$$X_{TK2/R100} = K_{T2} \cdot X_{T2/R100} = 0,98 \cdot 0,2486 = 0,2436 \Omega$$

$$\mathbf{T4/R100:} \quad X_{T4/R100} = Z_{T4/R100} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{10,20}{100} \cdot \frac{6^2}{16} = 0,2295 \Omega$$

$$x_{T4} = \frac{X_{T4}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{0,2295}{\frac{6^2}{16}} = 0,102, \quad K_{T4} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T4}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,102} = 0,9847$$

$$X_{TK4/R100} = K_{T4} \cdot X_{T4/R100} = 0,9847 \cdot 0,2295 = 0,226 \Omega$$

$$\mathbf{T5/R100:} \quad X_{T5/R100} = Z_{T5/R100} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{11,15}{100} \cdot \frac{6^2}{16} = 0,2509 \Omega$$

$$x_{T5} = \frac{X_{T5}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{0,2509}{\frac{6^2}{16}} = 0,1115, \quad K_{T5} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T5}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,1115} = 0,9795$$

$$X_{TK5/R100} = K_{T5} \cdot Z_{T5/R100} = 0,9795 \cdot 0,2509 = 0,2458 \Omega$$

Reaktance asynchronních motorů:

$$\mathbf{M1/R12:} \quad X_{M1/R12} = Z_{M1/R12} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 58} = 9,9543 \Omega$$

$$\mathbf{M1/R16:} \quad X_{M1/R16} = Z_{M1/R16} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 22,45} = 30,8606 \Omega$$

$$\mathbf{M31, M41:} \quad X_{M31} = X_{M41} = Z_{M31} = Z_{M41} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 32,1} = 21,5832 \Omega$$

Reaktance synchronních kompenzátorů a motorů:

$$\mathbf{1DAP:} \quad X_{1DAP} = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{16}{100} \cdot \frac{6^2}{6,5} = 0,8862 \Omega$$

$$2DAP: X_{2DAP} = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{6^2}{0,775} = 5,5742 \Omega$$

$$G1/R3: X_{G1/R3} = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{6^2}{3} = 1,2 \Omega$$

$$G1/R13: X_{G1/R13} = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{15}{100} \cdot \frac{6^2}{2,67} = 2,0225 \Omega$$

Reaktance a odpory kabelových vedení:

AYKCY 2x3x240, odkud R1 (k.č.01 + k.č.19) → kam R17 (k.č.1+k.č.2):

$$X_{kR1 \rightarrow R17} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,088 \cdot 1,35 = 0,0594 \Omega$$

$$R_{kR1 \rightarrow R17} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,125 \cdot 1,35 = 0,0844 \Omega$$

ANKOP 4x3x240, odkud R1 (k.č.05) → kam R23 (k.č.1):

$$X_{kR1 \rightarrow R23} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,0776 \cdot 0,241 = 0,0047 \Omega$$

$$R_{kR1 \rightarrow R23} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,129 \cdot 0,241 = 0,0078 \Omega$$

ANKOY 1x3x240, odkud R1 (k.č.09) → kam R21 (k.č.1)

$$X_{kR1 \rightarrow R21} = X_k \cdot l_k = 0,0776 \cdot 0,42 = 0,0326 \Omega$$

$$R_{kR1 \rightarrow R21} = R_k \cdot l_k = 0,129 \cdot 0,42 = 0,0542 \Omega$$

ANKOY 1x3x240, odkud R1 (k.č.16) → kam R21 (k.č.2)

$$X_{kR1 \rightarrow R21/2} = X_k \cdot l_k = 0,0776 \cdot 0,382 = 0,0296 \Omega$$

$$R_{kR1 \rightarrow R21/2} = R_k \cdot l_k = 0,129 \cdot 0,382 = 0,0493 \Omega$$

ANKOY 1x3x240, odkud R2 (k.č.22) → kam R8 (k.č.1):

$$X_{kR2 \rightarrow R8} = X_k \cdot l_k = 0,0776 \cdot 0,24 = 0,0186 \Omega$$

$$R_{kR2 \rightarrow R8} = R_k \cdot l_k = 0,129 \cdot 0,24 = 0,031 \Omega$$

ANKOP 4x3x240, odkud R2 (k.č.25) → kam R6 (k.č.3):

$$X_{kR2 \rightarrow R6} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,0776 \cdot 0,435 = 0,0084 \Omega$$

$$R_{kR2 \rightarrow R6} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,129 \cdot 0,435 = 0,014 \Omega$$

ANKOP 1x3x120, odkud R3 (k.č.03) → kam R11-1:

$$X_{kR3 \rightarrow R11} = X_k \cdot l_k = 0,0823 \cdot 0,414 = 0,0341 \Omega$$

$$R_{kR3 \rightarrow R11} = R_k \cdot l_k = 0,258 \cdot 0,414 = 0,1068 \Omega$$

ANKOY 1x3x240, odkud R3 (k.č. 4) → kam G1/R3 (komp.):

$$X_{kR3 \rightarrow G1/R3} = X_k \cdot l_k = 0,0776 \cdot 0,030 = 0,0023 \Omega$$

$$R_{kR3 \rightarrow G1/R3} = R_k \cdot l_k = 0,129 \cdot 0,030 = 0,0039 \Omega$$

ANKOY 1x3x240, odkud R3 (k.č.06) → kam R8 (k.č.7):

$$X_{kR3 \rightarrow R8} = X_k \cdot l_k = 0,0776 \cdot 0,27 = 0,021 \Omega$$

$$R_{kR3 \rightarrow R8} = R_k \cdot l_k = 0,129 \cdot 0,27 = 0,0348 \Omega$$

ANKOY 4x3x240, odkud R3 (k.č.07) → kam R23 (k.č.2):

$$X_{kR3 \rightarrow R23} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,0776 \cdot 0,28 = 0,0054 \Omega$$

$$R_{kR3 \rightarrow R23} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,129 \cdot 0,28 = 0,009 \Omega$$

AYKCY 1x3x240, odkud R3 (k.č.11) → kam R16 (k.č.5):

$$X_{kR3 \rightarrow R16} = X_k \cdot l_k = 0,088 \cdot 2,485 = 0,2187 \Omega$$

$$R_{kR3 \rightarrow R16} = R_k \cdot l_k = 0,125 \cdot 2,485 = 0,3106 \Omega$$

ANKOP 2x3x240, odkud R3 (k.č.13) → kam R12 (k.č.1):

$$X_{kR3 \rightarrow R12} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,0776 \cdot 0,283 = 0,011 \Omega$$

$$R_{kR3 \rightarrow R12} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,129 \cdot 0,283 = 0,0183 \Omega$$

ANKOP 4x3x240, odkud R3 (k.č.14) → R4 (k.č.14):

$$X_{kR3 \rightarrow R4} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,0776 \cdot 0,118 = 0,0023 \Omega$$

$$R_{kR3 \rightarrow R4} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,129 \cdot 0,118 = 0,0038 \Omega$$

ANKOY 1x3x240, odkud R3 (k.č.15) → kam R9 (k.č.1):

$$X_{kR3 \rightarrow R9} = X_k \cdot l_k = 0,0776 \cdot 0,349 = 0,0271 \Omega$$

$$R_{kR3 \rightarrow R9} = R_k \cdot l_k = 0,129 \cdot 0,349 = 0,045 \Omega$$

ANKOY 4x3x240, odkud R4 (k.č.05) → kam R13 (k.č.8):

$$X_{kR4 \rightarrow R13} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,0776 \cdot 0,045 = 0,0009 \Omega$$

$$R_{kR4 \rightarrow R13} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,129 \cdot 0,045 = 0,0015 \Omega$$

10-AKXEKCY 2x3x500, odkud R4 (k.č.06) → kam R14 (k.č.15):

$$X_{kR4 \rightarrow R14} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,094 \cdot 0,22 = 0,0103 \Omega$$

$$R_{kR4 \rightarrow R14} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,06 \cdot 0,22 = 0,0066 \Omega$$

ANKOY 1x3x240, odkud R4 (k.č.22) → kam R9 (k.č.10):

$$X_{kR4 \rightarrow R9} = X_k \cdot l_k = 0,0776 \cdot 0,4 = 0,031 \Omega$$

$$R_{kR4 \rightarrow R9} = R_k \cdot l_k = 0,129 \cdot 0,4 = 0,0516 \Omega$$

ANKOP 4x3x240, odkud R5 (k.č.04) → kam R13 (k.č.16):

$$X_{kR5 \rightarrow R13} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,0776 \cdot 0,525 = 0,0102 \Omega$$

$$R_{kR5 \rightarrow R13} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,129 \cdot 0,525 = 0,0169 \Omega$$

6-AYKCY 2x3x240, odkud R5 (k.č.08) → kam R24 (k.č.2):

$$X_{kR5 \rightarrow R24} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,088 \cdot 0,165 = 0,0073 \Omega$$

$$R_{kR5 \rightarrow R24} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,125 \cdot 0,165 = 0,0103 \Omega$$

AYKY 4x3x240, odkud R6 (k.č.02) → kam R5 (k.č.11):

$$X_{kR6 \rightarrow R5} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,088 \cdot 0,018 = 0,0004 \Omega$$

$$R_{kR6 \rightarrow R5} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,125 \cdot 0,018 = 0,0006 \Omega$$

AYKCYM 4x3x240, odkud R6 (k.č.04) → kam R1 (k.č.15):

$$X_{kR6 \rightarrow R1} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,088 \cdot 0,425 = 0,0094 \Omega$$

$$R_{kR6 \rightarrow R1} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,125 \cdot 0,425 = 0,0133 \Omega$$

ANKOP 2x3x240, odkud R13 (k.č.02) → kam R12 (k.č.12):

$$X_{kR13 \rightarrow R12} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,0776 \cdot 0,159 = 0,0062 \Omega$$

$$R_{kR13 \rightarrow R12} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,129 \cdot 0,159 = 0,0103 \Omega$$

AYKCY 1x3x240, odkud R13 (k.č.03) → kam R16 (k.č.1):

$$X_{kR13 \rightarrow R16} = X_k \cdot l_k = 0,088 \cdot 2,517 = 0,2215 \Omega$$

$$R_{kR13 \rightarrow R16} = R_k \cdot l_k = 0,125 \cdot 2,517 = 0,3146 \Omega$$

ANKOY 1x3x240, odkud R13 (k.č.07) → kam G1/R13 (komp.):

$$X_{kR13 \rightarrow G1/R13} = X_k \cdot l_k = 0,0776 \cdot 0,02 = 0,0016 \Omega$$

$$R_{kR13 \rightarrow G1/R13} = R_k \cdot l_k = 0,129 \cdot 0,2 = 0,0026 \Omega$$

10-AXEKCY 2x3x500, odkud R13 (k.č.09) → kam R14 (k.č.1):

$$X_{kR13 \rightarrow R14} = \frac{1}{2} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{2} \cdot 0,094 \cdot 0,174 = 0,0082 \Omega$$

$$R_{kR13 \rightarrow R14} = \frac{1}{2} \cdot R_k \cdot l_k = 0,06 \cdot 0,174 = 0,0052 \, \Omega$$

10-AXEKCY 4x3x240, odkud R13 (k.č.10) → kam R19 (k.č.14):

$$X_{kR13 \rightarrow R19} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,107 \cdot 0,2 = 0,0054 \, \Omega$$

$$R_{kR13 \rightarrow R19} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,125 \cdot 0,2 = 0,0063 \, \Omega$$

ANKOP 1x3x95, odkud R13 (k.č.11) → kam R11-2:

$$X_{kR13 \rightarrow R11} = X_k \cdot l_k = 0,0838 \cdot 0,264 = 0,0221 \, \Omega$$

$$R_{kR13 \rightarrow R11} = R_k \cdot l_k = 0,3259 \cdot 0,264 = 0,086 \, \Omega$$

AXEKCY 4x3x240, odkud R22 (k.č.01) → kam R1 (k.č.8):

$$X_{kR22 \rightarrow R1} = \frac{1}{4} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,107 \cdot 0,45 = 0,012 \, \Omega$$

$$R_{kR22 \rightarrow R1} = \frac{1}{4} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{4} \cdot 0,125 \cdot 0,45 = 0,0141 \, \Omega$$

ANKOY 8x3x240, odkud T1/R100 → kam R2 (k.č.24):

$$X_{kT1/R100 \rightarrow R2} = \frac{1}{8} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{8} \cdot 0,0776 \cdot 0,239 = 0,0023 \, \Omega$$

$$R_{kT1/R100 \rightarrow R2} = \frac{1}{8} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{8} \cdot 0,129 \cdot 0,239 = 0,0039 \, \Omega$$

CNKOP 8x3x120, odkud T2/R100 → kam R3 (k.č.18):

$$X_{kT2/R100 \rightarrow R3} = \frac{1}{8} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{8} \cdot 0,0823 \cdot 0,22 = 0,0023 \, \Omega$$

$$R_{kT2/R100 \rightarrow R3} = \frac{1}{8} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{8} \cdot 0,1566 \cdot 0,22 = 0,0043 \, \Omega$$

ANKOP 8x3x240, odkud T4/R100 → kam R4 (k.č.3):

$$X_{kT4/R100 \rightarrow R4} = \frac{1}{8} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{8} \cdot 0,0776 \cdot 0,333 = 0,0032 \, \Omega$$

$$R_{kT4/R100 \rightarrow R4} = \frac{1}{8} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{8} \cdot 0,129 \cdot 0,333 = 0,0054 \, \Omega$$

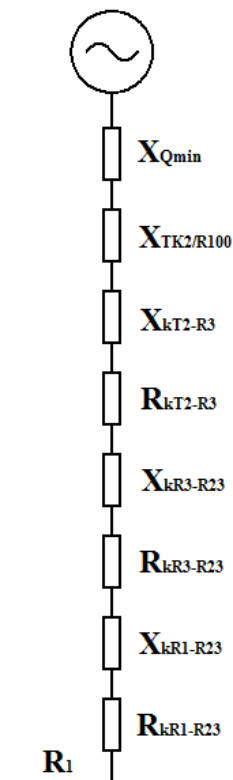
ANKOP 8x3x240, odkud T5/R100 → kam R13 (k.č.12):

$$X_{kT5/R100 \rightarrow R13} = \frac{1}{8} \cdot X_k \cdot l_k = \frac{1}{8} \cdot 0,0776 \cdot 0,325 = 0,0032 \, \Omega$$

$$R_{kT5/R100 \rightarrow R13} = \frac{1}{8} \cdot R_k \cdot l_k = \frac{1}{8} \cdot 0,129 \cdot 0,325 = 0,0052 \, \Omega$$

5.1.1 Výpočet minimálních zkratových poměrů varianta č. 1

Ukázka výpočtu minimálních zkratových poměrů pro rozvodnu R1. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze.



Obr. 5.1: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu na rozvodně R1 varianta č. 1

Výpočet celkové impedance:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_k &= jX_{kR1 \rightarrow R23} + R_{kR1 \rightarrow R23} + jX_{kR3 \rightarrow R23} + R_{kR3 \rightarrow R23} + jX_{kT2 \rightarrow R3} + R_{kT2 \rightarrow R3} + jX_{TK2/R100} + jX_{Qmin} = \\ &= j0,0047 + 0,0078 + j0,0054 + 0,009 + j0,0023 + 0,0043 + j0,2436 + j0,028 = \underline{\underline{0,0211 + j0,284 \Omega}} \end{aligned}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,284^2 + 0,0211^2} = \underline{\underline{0,2848 \Omega}}$$

Minimální počáteční rázový zkratový proud pro třífázový zkrat:

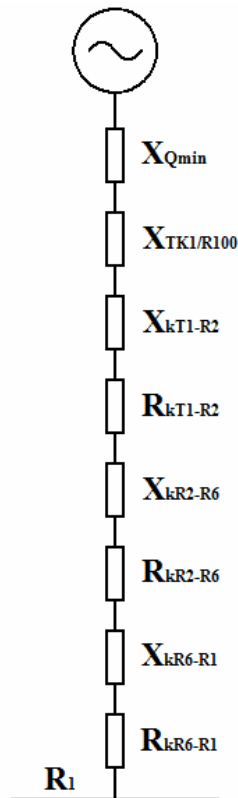
$$I''_{k3min} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,6}{\sqrt{3} \cdot 0,2848} = \underline{\underline{12,163 \text{ kA}}}$$

Minimální zkratový výkon pro třífázový zkrat:

$$S_{k3min} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 12,163 = \underline{\underline{126,402 \text{ MVA}}}$$

5.1.2 Výpočet minimálních zkratových poměrů varianta č. 2

Ukázka výpočtu minimálních zkratových poměrů pro rozvodnu R1. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze.



Obr. 5.2: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu na rozvodně R1 varianta č. 2

Výpočet celkové impedance:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_k &= jX_{kR6 \rightarrow R1} + R_{kR6 \rightarrow R1} + jX_{kR2 \rightarrow R6} + R_{kR2 \rightarrow R6} + jX_{kT1 \rightarrow R2} + R_{kT1 \rightarrow R2} + jX_{TK1/R100} + jX_{Qmin} = \\ &= j0,0094 + 0,0133 + j0,0084 + 0,014 + j0,0023 + 0,0039 + j0,2458 + j0,028 = \underline{\underline{0,0312 + j0,2939 \Omega}} \end{aligned}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,2939^2 + 0,0312^2} = \underline{\underline{0,2956 \Omega}}$$

Minimální počáteční rázový zkratový proud pro třífázový zkrat:

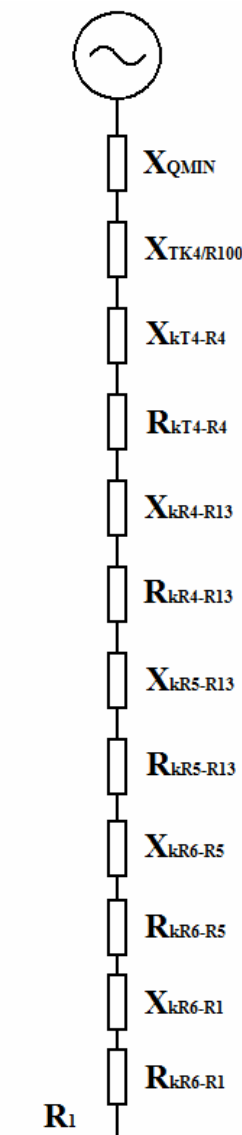
$$I_{k3min}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,6}{\sqrt{3} \cdot 0,2956} = \underline{\underline{11,719 \text{ kA}}}$$

Minimální zkratový výkon pro třífázový zkrat:

$$S_{k3min} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 11,719 = \underline{\underline{121,787 \text{ MVA}}}$$

5.1.3 Výpočet minimálních zkratových poměrů varianta č. 3

Ukázka výpočtu minimálních zkratových poměrů pro rozvodnu R1. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze.



Obr. 5.3: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu na rozvodně R1 varianta č. 3

Výpočet celkové impedance:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_k &= jX_{kR6 \rightarrow R1} + R_{kR6 \rightarrow R1} + jX_{kR6 \rightarrow R5} + R_{kR6 \rightarrow R5} + jX_{kR5 \rightarrow R13} + R_{kR5 \rightarrow R13} + jX_{kR4 \rightarrow R13} + R_{kR4 \rightarrow R13} + \\ &+ jX_{kT4 \rightarrow R4} + R_{kT4 \rightarrow R4} + jX_{TK4/R100} + jX_{Qmin} = j0,0094 + 0,0133 + j0,0004 + 0,0006 + j0,0102 + \\ &+ 0,0169 + j0,0009 + 0,0015 + j0,0032 + 0,0054 + j0,226 + j0,028 = \underline{\underline{0,0377 + j0,2781 \Omega}} \end{aligned}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,2781^2 + 0,0377^2} = \underline{\underline{0,2806 \Omega}}$$

Minimální počáteční rázový zkratový proud pro třífázový zkrat:

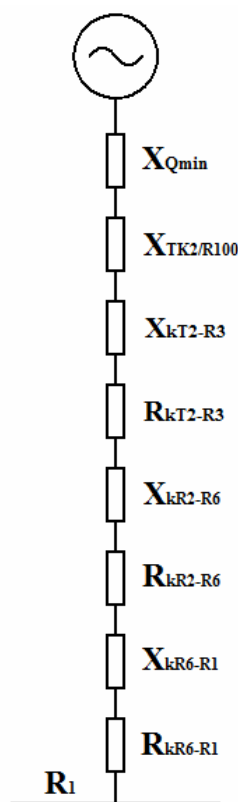
$$I_{k3\min}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,6}{\sqrt{3} \cdot 0,2806} = \underline{\underline{12,345 \text{ kA}}}$$

Minimální zkratový výkon pro třífázový zkrat:

$$S_{k3\min} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 12,345 = \underline{\underline{128,293 \text{ MVA}}}$$

5.1.4 Výpočet minimálních zkratových poměrů varianta č. 4

Ukázka výpočtu minimálních zkratových poměrů pro rozvodnu R1. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze.



Obr. 5.4: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 4

Výpočet celkové impedance:

$$\underline{Z}_k = jX_{kR6 \rightarrow R1} + R_{kR6 \rightarrow R1} + jX_{kR2 \rightarrow R6} + R_{kR2 \rightarrow R6} + jX_{kT2 \rightarrow R3} + R_{kT2 \rightarrow R3} + jX_{TK2/R100} + jX_{Q\min} = \\ j0,0094 + 0,0133 + j0,0084 + 0,014 + j0,0023 + 0,0043 + j0,2436 + j0,028 = \underline{\underline{0,0316 + j0,2917 \Omega}}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z_k| = \sqrt{0,2917^2 + 0,0316^2} = \underline{\underline{0,2934 \Omega}}$$

Minimální počáteční rázový zkratový proud pro třífázový zkrat:

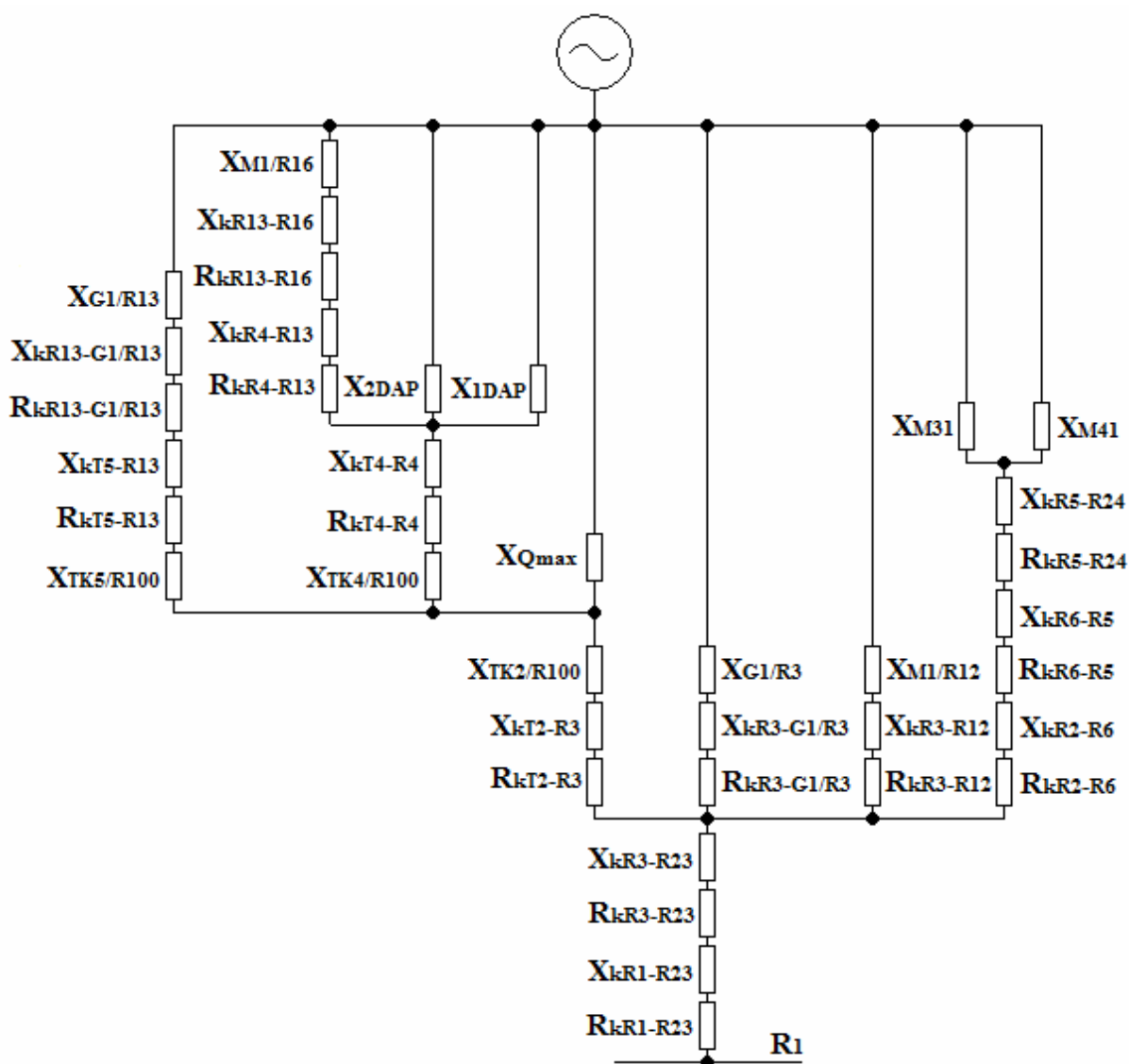
$$I''_{k3\min} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,6}{\sqrt{3} \cdot 0,2934} = \underline{\underline{11,807 \text{ kA}}}$$

Minimální zkratový výkon pro třífázový zkrat:

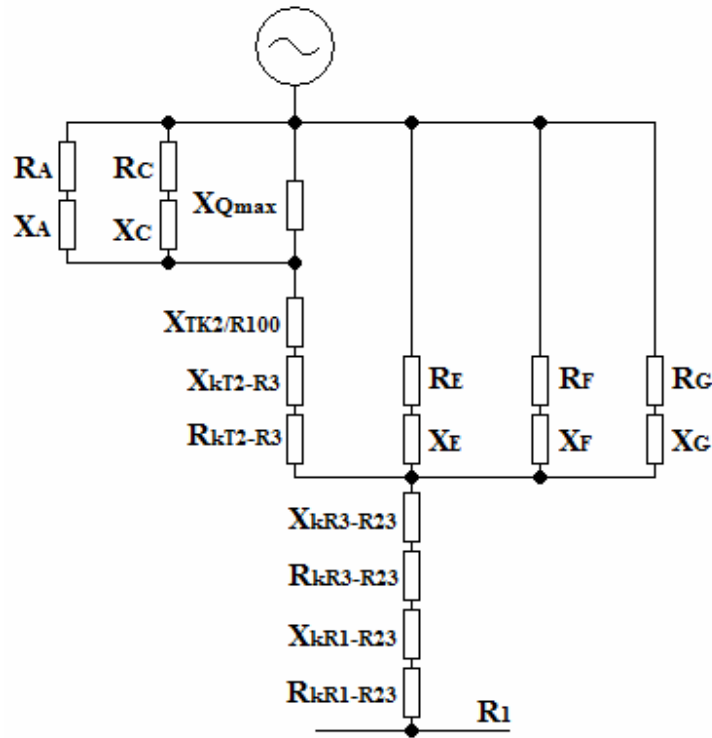
$$S_{k3\min} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 11,807 = \underline{\underline{122,702 \text{ MVA}}}$$

5.1.5 Výpočet maximálních zkratových poměrů varianta č. 1

Ukázka výpočtu maximálních zkratových poměrů pro rozvodnu R1. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze.



Obr. 5.5: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 1



Obr. 5.6: Postupné zjednodušení náhradního schématu varianta č. 1

Výpočet celkové impedance:

$$\underline{Z}_A = jX_{G1/R13} + jX_{kR13-G1/R13} + R_{kR13-G1/R13} + jX_{kT5-R13} + R_{kT5-R13} + jX_{TK5/R100} = j2,0225 + j0,0016 + 0,0026 + j0,0032 + 0,0052 + j0,2458 = 0,0078 + j2,2731 \Omega$$

$$\underline{Z}_B = jX_{M1/R16} + jX_{kR13-R16} + R_{kR13-R16} + jX_{kR4-R13} + R_{kR4-R13} = j30,8606 + j0,2215 + 0,3146 + j0,0009 + 0,0015 = 0,3161 + j31,083 \Omega$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{jX_{2DAP}} + \frac{1}{jX_{1DAP}}} + jX_{TK4/R100} + jX_{kT4-R4} + R_{kT4-R4} = \frac{1}{\frac{1}{0,3161 + j31,083} + \frac{1}{j5,5742} + \frac{1}{j0,8862}} + j0,226 + j0,0032 + 0,0054 = 0,0056 + j0,9755 \Omega$$

$$\underline{Z}_D = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_C} + \frac{1}{jX_{Qmay}}} + jX_{TK2/R100} + jX_{kT2-R3} + R_{kT2-R3} = \frac{1}{\frac{1}{0,0078 + j2,2731} + \frac{1}{0,0056 + j0,9755} + \frac{1}{j0,0116}} + j0,2436 + j0,0023 + 0,0043 = 0,0043 + j0,2573 \Omega$$

$$\underline{Z}_E = jX_{G1/R3} + jX_{kR3-G1/R3} + R_{kR3-G1/R3} = j1,2 + j0,0023 + 0,0039 = 0,0039 + j1,2023 \Omega$$

VÝPOČET MAXIMÁLNÍCH A MINIMÁLNÍCH ZKRATOVÝCH POMĚRŮ

$$\underline{Z}_F = jX_{M1/R12} + jX_{kR3-R12} + R_{kR3-R12} = j9,9543 + j0,011 + 0,0183 = \underline{\underline{0,0183 + j9,9653 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_G = \frac{1}{\frac{1}{jX_{M31}} + \frac{1}{jX_{M41}}} + jX_{kR5-R24} + R_{kR5-R24} + jX_{kR6-R5} + R_{kR6-R5} + jX_{kR2-R6} + R_{kR2-R6} =$$

$$\frac{1}{2 \cdot \frac{1}{j21,5832}} + j0,0073 + 0,0103 + j0,0004 + 0,0006 + j0,0084 + 0,014 = \underline{\underline{0,0249 + j10,8077 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_H = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_D} + \frac{1}{\underline{Z}_E} + \frac{1}{\underline{Z}_F} + \frac{1}{\underline{Z}_G}} =$$

$$\frac{1}{\frac{1}{0,0043 + j0,2573} + \frac{1}{0,0039 + j1,2023} + \frac{1}{0,0183 + j9,9653} + \frac{1}{0,0249 + j10,8077}} = \underline{\underline{0,0028 + j0,2036 \Omega}}$$

$$\underline{Z} = \underline{Z}_H + jX_{kR3-R23} + R_{kR3-R23} + jX_{kR1-R23} + R_{kR1-R23} =$$

$$0,0028 + j0,2036 + j0,0054 + 0,009 + j0,0047 + 0,0078 = \underline{\underline{0,0196 + j0,2137 \Omega}}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z| = \sqrt{0,0196^2 + 0,2137^2} = \underline{\underline{0,2146 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud pro třífázový zkrat:

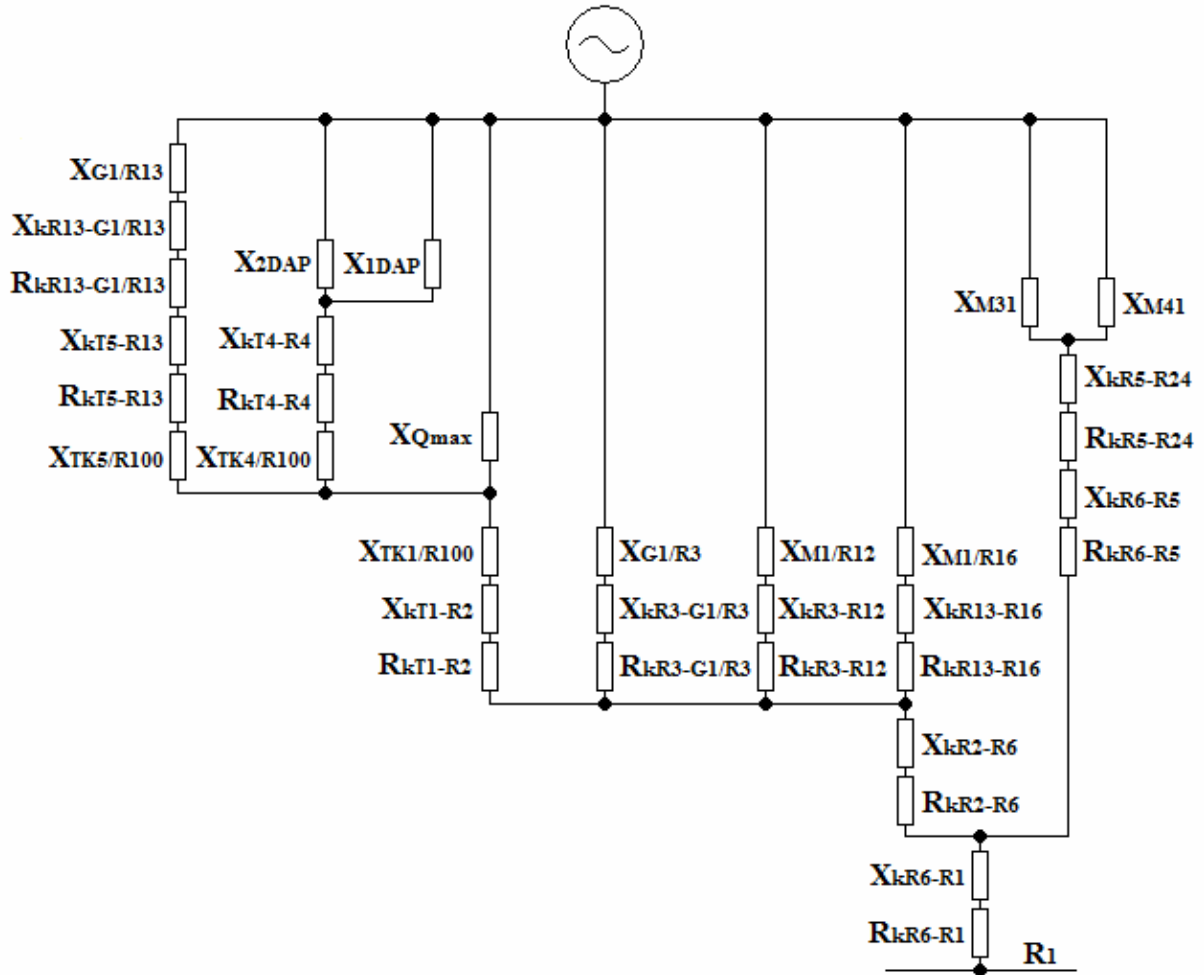
$$I_{k3\max}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2146} = \underline{\underline{17,756 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon pro třífázový zkrat:

$$S_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 17,756 = \underline{\underline{184,526 \text{ MVA}}}$$

5.1.6 Výpočet maximálních zkratových poměrů varianta č. 2

Ukázka výpočtu maximálních zkratových poměrů pro rozvodnu R1. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze.

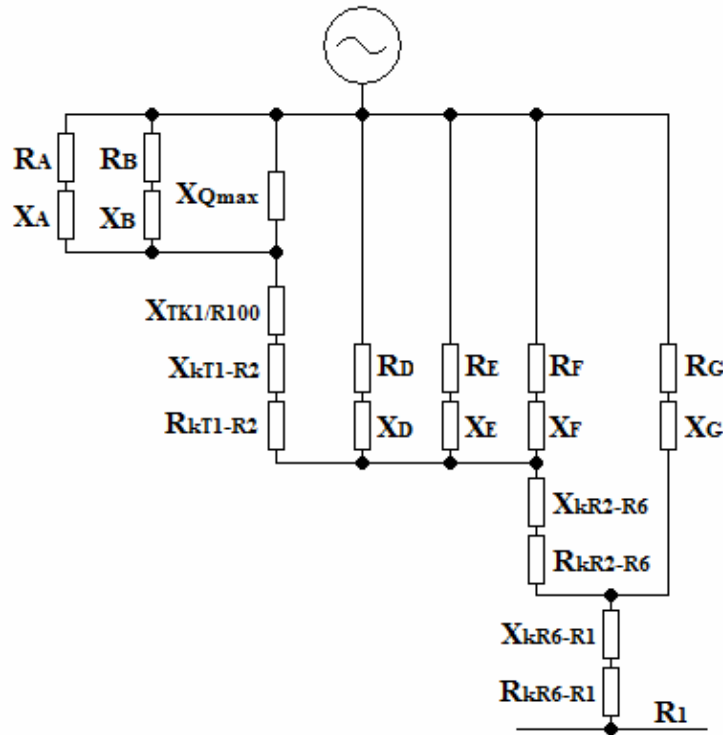


Obr. 5.7: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 2

Výpočet celkové impedance:

$$\underline{Z}_A = jX_{G1/R13} + jX_{kR13-G1/R13} + R_{kR13-G1/R13} + jX_{kT5-R13} + R_{kT5-R13} + jX_{TK5/R100} = j2,0225 + j0,0016 + 0,0026 + j0,0032 + 0,0052 + j0,2458 = \underline{0,0078 + j2,2731 \Omega}$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{\frac{1}{jX_{2DAP}} + \frac{1}{jX_{1DAP}}} + jX_{kT4-R4} + R_{kT4-R4} + jX_{TK4/R100} = \frac{1}{\frac{1}{j5,5742} + \frac{1}{j0,8862}} + j0,0032 + 0,0054 + j0,226 = \underline{0,0054 + j0,9938 \Omega}$$



Obr. 5.8: Postupné zjednodušení náhradního schématu varianta č. 2

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{jX_{Q\max}}} + jX_{TK1/R100} + jX_{kT1-R2} + R_{kT1-R2} =$$

$$\frac{1}{\frac{1}{0,0078 + j2,2731} + \frac{1}{0,0054 + j0,9938} + \frac{1}{j0,0116}} + j0,2458 + j0,0023 + 0,0039 = \underline{\underline{0,0039 + j0,2595 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_D = jX_{G1/R3} + jX_{kR3-G1/R3} + R_{kR3-G1/R3} = j1,2 + j0,0023 + 0,0039 = \underline{\underline{0,0039 + j1,2023 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_E = jX_{M1/R12} + jX_{kR3-R12} + R_{kR3-R12} = j9,9543 + j0,011 + 0,0183 = \underline{\underline{0,0183 + j9,9653 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_F = jX_{M1/R16} + jX_{kR3-R16} + R_{kR3-R16} = j30,8606 + j0,2187 + 0,3106 = \underline{\underline{0,3106 + j31,0793 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_G = \frac{1}{\frac{1}{jX_{M31}} + \frac{1}{jX_{M41}}} + jX_{kR5-R24} + R_{kR5-R24} + jX_{kR6-R5} + R_{kR6-R5} = \frac{1}{\frac{1}{j21,5832} + \frac{1}{j21,5832}} +$$

$$j0,0073 + 0,0103 + j0,0004 + 0,0006 = \underline{\underline{0,0109 + j10,7993 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_H = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_C} + \frac{1}{\underline{Z}_D} + \frac{1}{\underline{Z}_E} + \frac{1}{\underline{Z}_F}} =$$

$$\frac{1}{\frac{1}{0,0039 + j0,2595} + \frac{1}{0,0039 + j1,2023} + \frac{1}{0,0183 + j9,9653} + \frac{1}{0,3106 + j31,0793}} =$$

$$\underline{0,0027 + j0,2076 \, \Omega}$$

$$\underline{Z}_{CH} = \underline{Z}_H + jX_{kR2-R6} + R_{kR2-R6} = 0,0027 + j0,2076 + j0,0084 + 0,014 = \underline{0,0167 + j0,216 \, \Omega}$$

$$\underline{Z}_I = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{CH}} + \frac{1}{\underline{Z}_G}} = \frac{1}{\frac{1}{0,0167 + j0,216} + \frac{1}{0,0109 + j10,7993}} = \underline{0,0161 + j0,2118 \, \Omega}$$

$$\underline{Z} = \underline{Z}_I + jX_{kR6-R1} + R_{kR6-R1} = 0,0161 + j0,2118 + j0,0094 + 0,0133 = \underline{0,0294 + j0,2212 \, \Omega}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

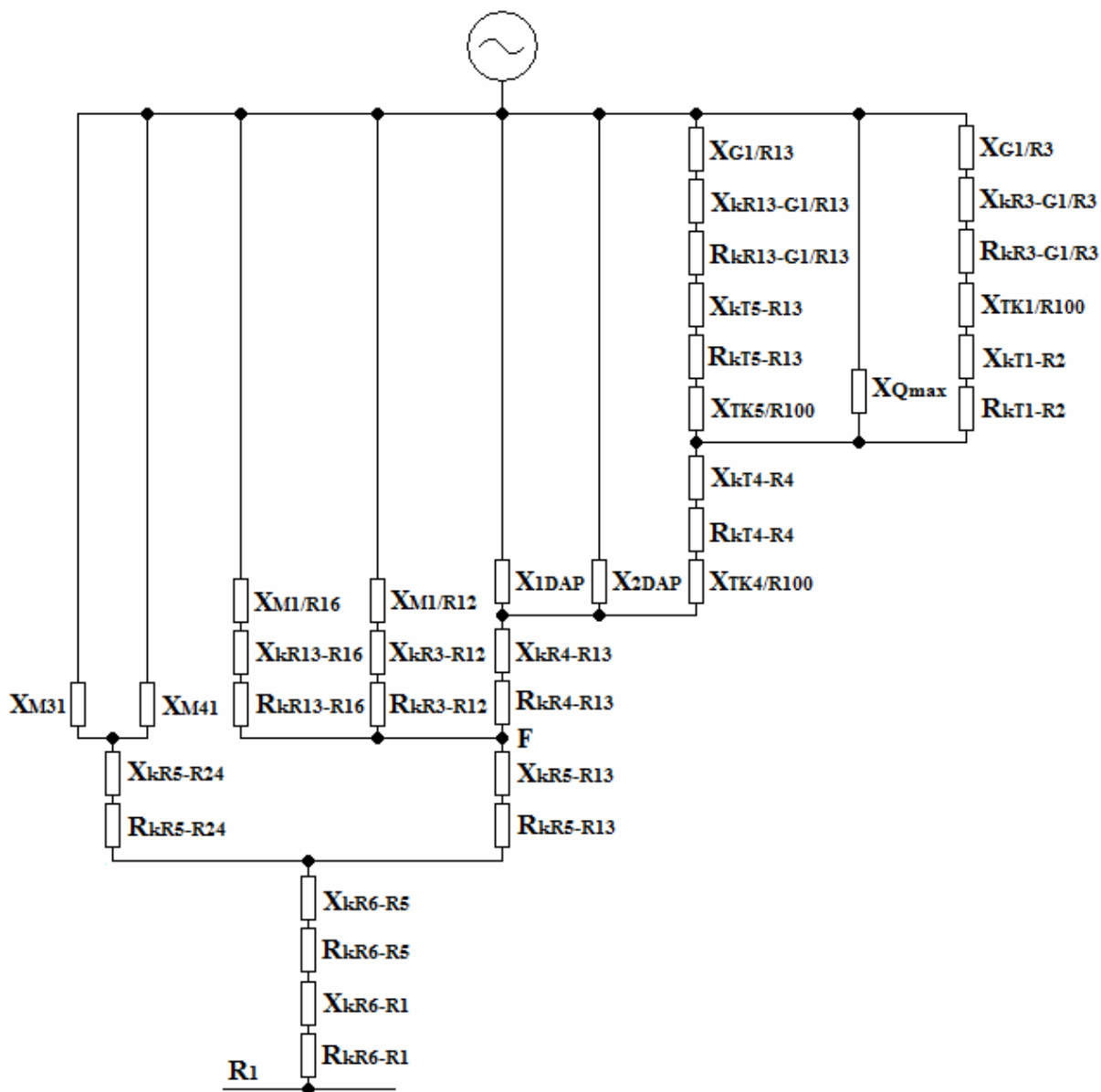
$$|Z| = \sqrt{0,0294^2 + 0,2212^2} = \underline{0,2231 \, \Omega}$$

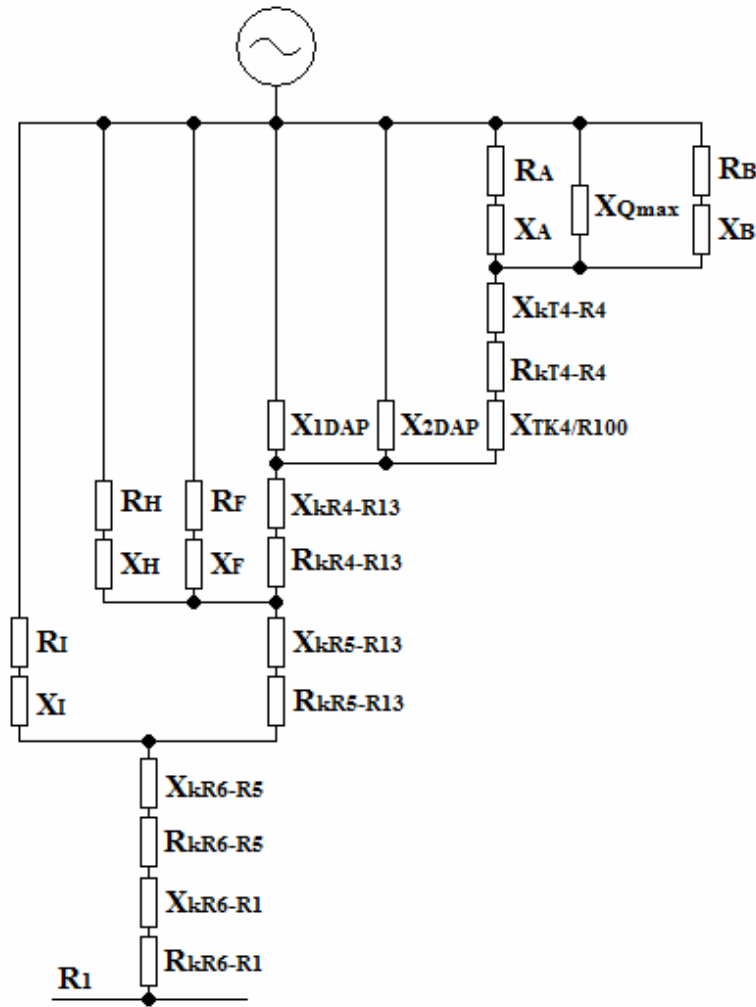
Maximální počáteční rázový zkratový proud pro třífázový zkrat:

$$I''_{k3 \max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,2231} = \underline{17,08 \, \text{kA}}$$

Maximální zkratový výkon pro třífázový zkrat:

$$S_{k3 \max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 17,08 = \underline{177,501 \, \text{MVA}}$$





Obr. 5.10: Postupné zjednodušení náhradního schématu varianta č. 3

Výpočet celkové impedance:

$$\underline{Z}_A = jX_{G1/R13} + jX_{kr13-G1/R13} + R_{kr13-G1/R13} + jX_{kt5-R13} + R_{kt5-R13} + jX_{TK5/R100} = \\ j2,0225 + j0,0016 + 0,0026 + j0,0032 + 0,0052 + j0,2458 = \underline{\underline{0,0078 + j2,2731 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_B = jX_{G1/R3} + jX_{kr3-G1/R3} + R_{kr3-G1/R3} + jX_{kt1-R2} + R_{kt1-R2} + jX_{TK1/R100} = j1,2 + j0,0023 + \\ 0,0039 + j0,0023 + 0,0039 + j0,2458 = \underline{\underline{0,0078 + j1,4504 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{jX_{Qmax}}} + jX_{kt4-R4} + R_{kt4-R4} + jX_{TK4/R100} = \\ \frac{1}{\frac{1}{0,0078 + j2,2731} + \frac{1}{0,0078 + j1,4504} + \frac{1}{j0,0116}} + j0,0032 + 0,0054 + j0,226 = \underline{\underline{0,0054 + j0,2406 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_D = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_C} + \frac{1}{jX_{2DAP}} + \frac{1}{jX_{1DAP}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,0054 + j0,2406} + \frac{1}{j5,5742} + \frac{1}{j0,8862}} = \underline{0,0031 + j0,1830 \Omega}$$

$$\underline{Z}_E = \underline{Z}_D + jX_{kR4-R13} + R_{kR4-R13} = 0,0031 + j0,1830 + j0,0009 + 0,0015 = \underline{0,0046 + j0,1839 \Omega}$$

$$\underline{Z}_F = jX_{M1/R12} + jX_{kR13-R12} + R_{kR13-R12} = j9,9543 + j0,0062 + 0,0103 = \underline{0,0103 + j9,9605 \Omega}$$

$$\underline{Z}_H = jX_{M1/R16} + jX_{kR13-R16} + R_{kR13-R16} = j30,8606 + j0,2215 + 0,3146 = \underline{0,3146 + j31,0821 \Omega}$$

$$\underline{Z}_G = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_E} + \frac{1}{\underline{Z}_F} + \frac{1}{\underline{Z}_H}} = \frac{1}{\frac{1}{0,0046 + j0,1839} + \frac{1}{0,0103 + j9,9605} + \frac{1}{0,3146 + j31,0821}} = \underline{0,0044 + j0,1795 \Omega}$$

$$\underline{Z}_{CH} = \underline{Z}_G + jX_{kR5-R13} + R_{kR5-R13} = 0,0044 + j0,1795 + j0,0102 + 0,0169 = \underline{0,0213 + j0,1897 \Omega}$$

$$\underline{Z}_I = \frac{1}{\frac{1}{jX_{M31}} + \frac{1}{jX_{M41}}} + jX_{kR5-R24} + R_{kR5-R24} = \frac{1}{\frac{1}{j21,5832} + \frac{1}{j21,5832}} + j0,0073 + 0,0103 = \underline{0,0103 + j10,7989 \Omega}$$

$$\underline{Z} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{CH}} + \frac{1}{\underline{Z}_I}} + jX_{kR6-R5} + R_{kR6-R5} + jX_{kR6-R1} + R_{kR6-R1} = \frac{1}{\frac{1}{0,0213 + j0,1897} + \frac{1}{0,0103 + j10,7989}} + j0,0004 + 0,0006 + j0,0094 + 0,0133 = \underline{0,0345 + j0,1963 \Omega}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z| = \sqrt{0,0345^2 + 0,1963^2} = \underline{0,1993 \Omega}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud pro třífázový zkrat:

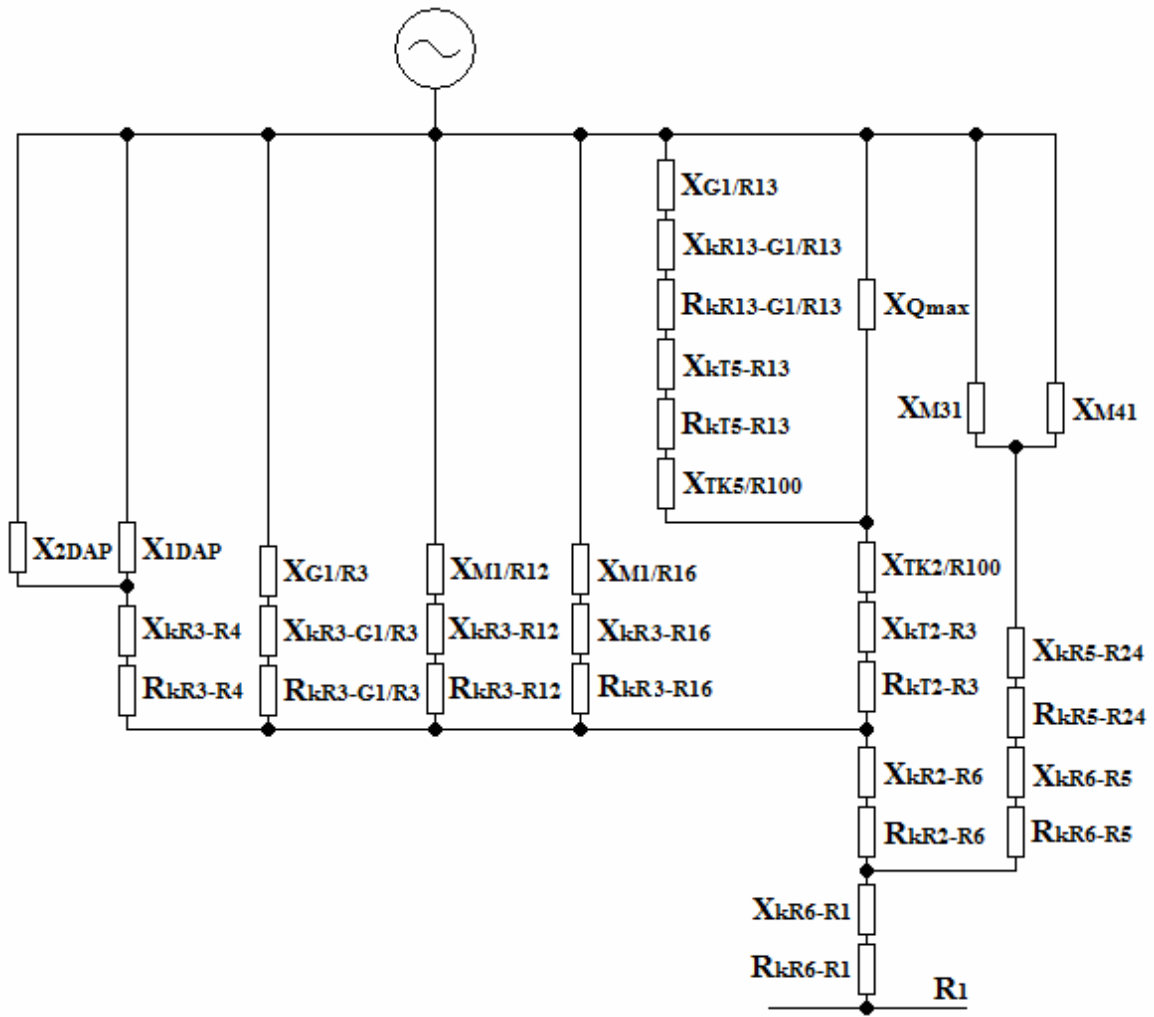
$$I_{k3\max}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,1993} = \underline{19,119 \text{ kA}}$$

Maximální zkratový výkon pro třífázový zkrat:

$$S_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 19,119 = \underline{198,69 \text{ MVA}}$$

5.1.8 Výpočet maximálních zkratových poměrů varianta č. 4

Ukázka výpočtu maximálních zkratových poměrů pro rozvodnu R1. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze.



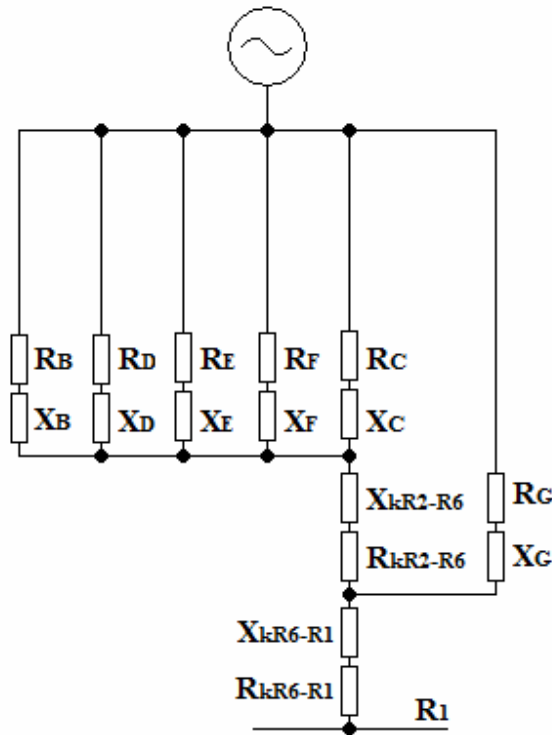
Obr. 5.11: Náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu pro rozvodnu R1 varianta č. 4

Výpočet celkové impedance:

$$\underline{Z}_A = jX_{G1/R13} + jX_{kR13-G1/R13} + R_{kR13-G1/R13} + jX_{kT5-R13} + R_{kT5-R13} + jX_{TK5/R100} = \\ j2,0225 + j0,0016 + 0,0026 + j0,0032 + 0,0052 + j0,2458 = \underline{\underline{0,0078 + j2,2731 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{\frac{1}{jX_{2DAP}} + \frac{1}{jX_{1DAP}}} + jX_{kR3-R4} + R_{kR3-R4} = \frac{1}{\frac{1}{j5,5742} + \frac{1}{j0,8862}} + j0,0023 + 0,0038 = \\ \underline{\underline{0,0038 + j0,7669 \Omega}}$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{jX_{Qmax}}} + jX_{TK2/R100} + jX_{kT2-R3} + R_{kT2-R3} = \frac{1}{\frac{1}{0,0078 + j2,2731} + \frac{1}{j0,0116}} + j0,2436 + \\ j0,0023 + 0,0043 = \underline{\underline{0,0043 + j0,2574 \Omega}}$$



Obr. 5.12: Postupné zjednodušení náhradního schématu varianta č. 4

$$\underline{Z}_D = jX_{G1/R3} + jX_{kR3-G1/R3} + R_{kR3-G1/R3} = j1,2 + j0,0023 + 0,0039 = \underline{0,0039 + j1,2023 \Omega}$$

$$\underline{Z}_E = jX_{M1/R12} + jX_{kR3-R12} + R_{kR3-R12} = j9,9543 + j0,011 + 0,0183 = \underline{0,0183 + j9,9653 \Omega}$$

$$\underline{Z}_F = jX_{M1/R16} + jX_{kR3-R16} + R_{kR3-R16} = j30,8606 + j0,2187 + 0,3106 = \underline{0,3106 + j31,0793 \Omega}$$

$$\underline{Z}_G = \frac{1}{\frac{1}{jX_{M31}} + \frac{1}{jX_{M41}}} + jX_{kR5-R24} + R_{kR5-R24} + jX_{kR6-R5} + R_{kR6-R5} = \frac{1}{\frac{1}{j21,5832} + \frac{1}{j21,5832}} + j0,0073 + 0,0103 + j0,0004 + 0,0006 = \underline{0,0109 + j10,7993 \Omega}$$

$$\underline{Z}_H = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_D} + \frac{1}{\underline{Z}_E} + \frac{1}{\underline{Z}_F} + \frac{1}{\underline{Z}_C}} =$$

$$\frac{1}{\frac{1}{0,0038 + j0,7669} + \frac{1}{0,0039 + j1,2023} + \frac{1}{0,0183 + j9,9653} + \frac{1}{0,3106 + j31,0739} + \frac{1}{0,0043 + j0,2574 + j0,002 + j0,1625 \Omega}} =$$

$$\underline{Z}_{CH} = \underline{Z}_H + jX_{kR2-R6} + jX_{kR2-R6} = 0,002 + j0,1625 + 0,014 + j0,0084 = \underline{0,016 + j0,1709 \Omega}$$

$$\underline{Z}_I = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{CH}} + \frac{1}{\underline{Z}_G}} = \frac{1}{\frac{1}{0,016 + j0,1709} + \frac{1}{0,0109 + j10,7993}} = \underline{0,0155 + j0,1683 \Omega}$$

VÝPOČET MAXIMÁLNÍCH A MINIMÁLNÍCH ZKRATOVÝCH POMĚRŮ

$$\underline{Z} = \underline{Z}_I + jX_{kR6-R1} + R_{kR6-R1} = 0,0155 + j0,1683 + 0,0094 + 0,0133 = \underline{\underline{0,0288 + j0,1777 \Omega}}$$

Absolutní hodnota celkové impedance:

$$|Z| = \sqrt{0,0288^2 + 0,1777^2} = \underline{\underline{0,18 \Omega}}$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud pro třífázový zkrat:

$$I_{k3\max}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,18} = \underline{\underline{21,17 \text{ kA}}}$$

Maximální zkratový výkon pro třífázový zkrat:

$$S_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 21,17 = \underline{\underline{220,005 \text{ MVA}}}$$

6. KONTROLA ZAŘÍZENÍ Z HLEDISKA ÚČINKŮ ZKRATOVÉHO PROUDU

6.1 Posouzení zkratové odolnosti rozvodn vn

Tab. 6-1: Zkratová odolnost rozvoden

Rozvodna	Popis	U_N	Jmenovitá zkratová odolnost S_N	Vypočtený zkratový výkon S_{k3max}
(-)	(-)	(kV)	(MVA)	(MVA)
R1	Sever	6	350	220,005
R2	Kvarto Siemens	6	400	247,347
R3	Kvarto Fučík	6	400	247,347
R4	Trafopásek I	6	400	245,051
R5	Teplárna	6	350	233,765
R6	Teplárna	6	350	234,315
R8	Hala I - jih	6	350	214,289
R9	Starý závod	6	350	205,186
R11	Administrativní bud.	6	350	181,398
R12	Mořirna	6	350	230,366
R13 B	Trafopásek II	6	400	243,689
R14	Oduhličovací linka	6	350	231,717
R16	Čerpací stanice	6	200	81,548
R17	ČOV	6	350	150,74
R19	Kvarto II	6	350	167,586
R21	Lisovna	6	350	197,215
R22	Nová hrubá trať	6	350	203,596
R23	Speciální mořirna	6	350	212,907
R24	Nová kompresorová st.	6	-	222,853

Všechny rozvodny z hlediska dovoleného zkratového výkonu vyhovují.

6.2 Kontrola kabelů vn na oteplení při zkratu

Tepelné účinky zkratových proudů jsou dány působením zkratového proudu po dobu trvání zkratu. Doba trvání zkratu je tak malá, že se vyvinuté teplo nestačí odvést a akumuluje se ve vodičích, které zvýší svou teplotu. Ochrany tedy musí vypnout každý zkratový proud dříve, než dojde k přehřátí jádra vodiče nad dovolenou maximální hranici, neboť by došlo k degradaci izolace a následnému poškození kabelu. [6]

Maximální doba vypnutí zkratu se určí pomocí vztahu:

$$t_k \leq \left[\frac{K \cdot S}{I_{th}} \right]^2 \quad (\text{s; -; mm}^2; \text{A}), \quad (6.1)$$

kde

K koeficient podle tab. 6-2,

S průřez vodiče,

I_{th} ekvivalentní oteplovací zkratový proud.

Předpokládáme, že doba vypnutí zkratových proudů ochranami bude do 0,5 s. Tato doba zahrnuje dobu působení ochrany a dobu vypnutí vypínačem.

Tab. 6-2: Koeficient K pro určení minimálního průřezu vodičů podle oteplení při zkratu

Druh izolace	Napětí	Značka	K		
			Cu	Al	Fe
	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Napuštěný papír	do 6 kV	N	127	84	-
	do 10 kV		130	86	-
	do 22 kV		108	71	-
Polyvinylchlorid	do 10 kV	Y	113	75	-
Sít'ovaný polyetylén	do 22 kV	X	141	93	-
Holé vodiče mechanicky nezatížené			152	107	-
Holé vodiče mechanicky zatížené			119	84	-
Ocel mechanicky nezatížená			-	-	59
Ocel mechanicky zatížená			-	-	39

Pro výpočet kontroly kabelů je nutné určit ekvivalentní oteplovací proud I_{th} podle ČSN EN 60909-0 [11].

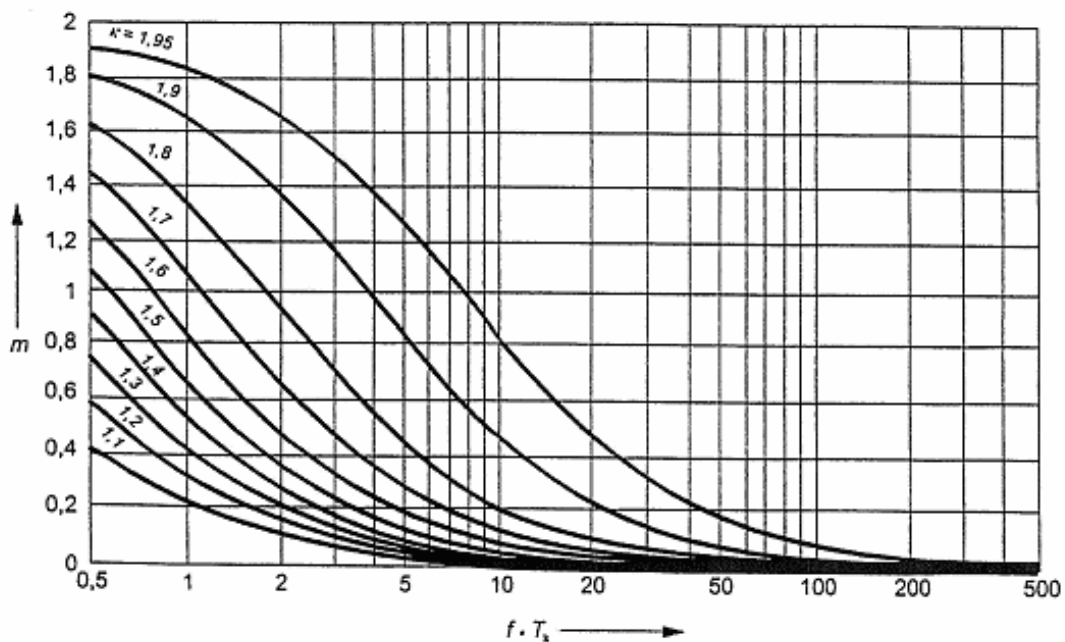
$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m+n} \quad (\text{A; -; -}), \quad (6.2)$$

kde

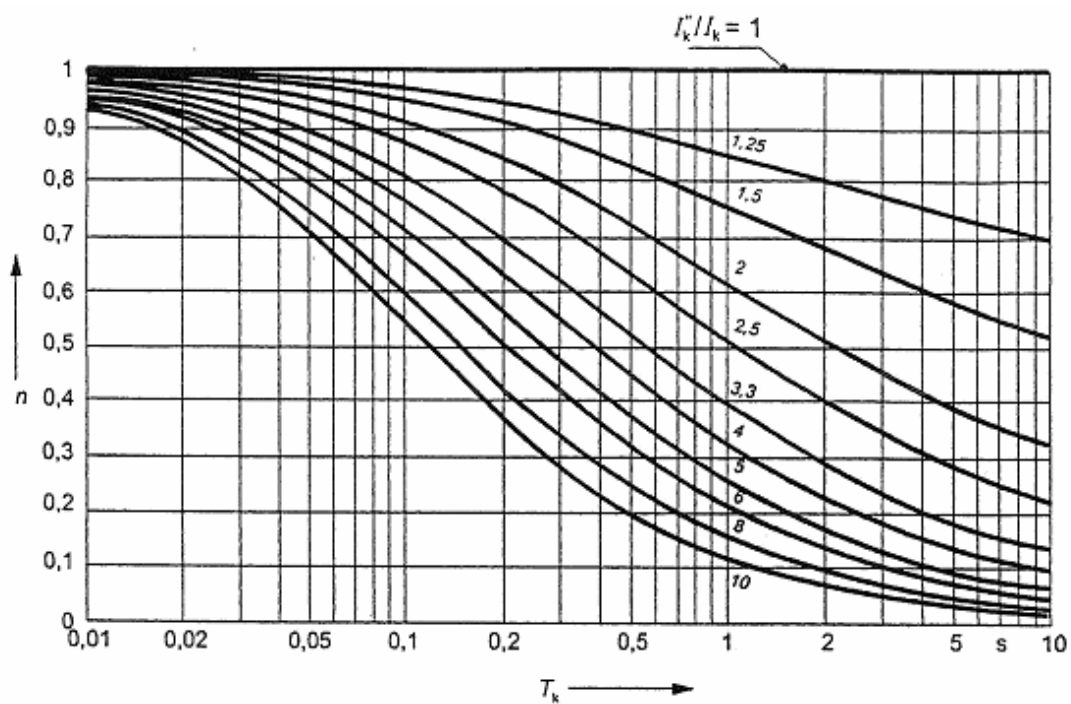
I_k'' počáteční rázový zkratový proud,

m součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu obr. 6.1,

n součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu obr. 6.2.



Obr. 6.1: Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu [11]



Obr. 6.2: Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu [11]

Součinitelé m a n jsou určeny z obr. 6-1 a 6-2. Součinitel m je získán s použitím součinu frekvence f , doby trvání zkratového proudu T_k a součinitele κ . Pro elektricky vzdálené zkraty je možné použít $n = 1$.

Hodnota κ se vypočítá pomocí vztahu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R / X} \quad (-; \Omega; \Omega), \quad (6.3)$$

kde

R/X poměr rezistance a reaktance celkové zkratové impedance [11].

6.2.1 Příklad výpočtu kontroly kabelu z rozvodny R1 do rozvodny R23

Aby bylo možné určit součinitel m a n , tak se nejdříve musí vypočítat součinitel κ :

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R / X} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-0,0288 / 0,1777} = \underline{\underline{1,62}}$$

Z daně křivky κ a součinu frekvence f a doby trvání zkratového proudu $T_k - 50 \cdot 0,5 = 25$ je určena hodnota $m = 0,04$. Pro přesnější určení m je možné použít vztah podle [11]:

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot \left[e^{4 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1 \right] = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \ln(1,62 - 1)} \cdot \left[e^{4 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \ln(1,62 - 1)} - 1 \right] = \underline{\underline{0,0418}}$$

Pro vzdálené zkraty je možné použít koeficient $n = 1$.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} = 21,17 \cdot \sqrt{0,0418 + 1} = 21,17 \cdot 1,02 = \underline{\underline{21,593 \text{ kA}}}$$

Maximální doba odpojení zkratového proudu:

$$t_k \leq \left[\frac{K \cdot S}{I_{th}} \right]^2 = \left[\frac{84 \cdot 960}{21593} \right]^2 = \underline{\underline{13,95 \text{ s}}}$$

Tab. 6-3: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R1 Sever

Odkud	Kam	Typ kabelu	Průřez	Počet	I_{th}	K	t_k
			(mm ²)	(-)	(kA)	(-)	(s)
R1 (k.č.01)	R17 (k.č.1)	AYKCY 1x3x240	240	1	21,593	75	0,69
R1 (k.č.05)	R23 (k.č.1)	ANKOP 4x3x240	960	4	21,593	84	13,95
R1 (k.č.08)	R22 (k.č.01)	AXEKCY 4x3x240	960	4	21,593	93	17,1
R1 (k.č.09)	R21 (k.č.1)	ANKOY 1x3x240	240	1	21,593	84	0,87
R1 (k.č.16)	R21 (k.č.2)	ANKOY 2x3x240	240	1	21,593	84	0,87
R1 (k.č.19)	R17 (k.č.2)	AYKCY 1x3x240	240	1	21,593	75	0,69
R1 (k.č.20)	R24 (k.č.1)	6-AYKCY 2x3x240	480	2	21,593	75	2,78

Tab. 6-4: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R2 Kvarto Siemag

Odkud	Kam	Typ kabelu	Průřez	Počet	I_{th}	K	t_k
			(mm ²)	(-)	(kA)	(-)	(s)
R2 (k.č.22)	R8 (k.č.1)	ANKOY 1x3x240	240	1	24,277	84	0,69
R2 (k.č.24)	T1/R100	ANKOY 8x3x240	1920	8	24,277	84	44,13
R2 (k.č.25)	R6 (k.č.3)	ANKOP 4x3x240	960	4	24,277	84	11,03

KONTROLA ZAŘÍZENÍ Z HLEDISKA ÚČINKŮ ZKRATOVÉHO PROUDU**Tab. 6-5: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R3 Kvarto Fučík**

Odkud	Kam	Typ kabelu	Průřez	Počet	I_{th}	K	t_k
			(mm ²)	(-)	(kA)	(-)	(s)
R3 (k.č.03)	R11-1 (T1/R11)	ANKOP 1x3x120	120	1	24,277	84	0,17
R3 (k.č.04)	G1/R3 (komp.)	ANKOY 1x3x240	240	1	24,277	84	0,69
R3 (k.č.06)	R8 (k.č.7)	ANKOY 1x3x240	240	1	24,277	84	0,69
R3 (k.č. 07)	R23(k.č.2)	ANKOY 4x3x240	960	4	24,277	84	11,03
R3 (k.č.11)	R16 (k.č.5)	AYKCY 1x3x240	240	1	24,277	75	0,55
R3 (k.č.13)	R12 (k.č.1)	ANKOP 2x3x240	480	2	24,277	84	2,76
R3 (k.č.14)	R4 (k.č.14)	ANKOP 4x3x240	960	4	24,277	84	11,03
R3 (k.č.15)	R9 (k.č.1)	ANKOY 1x3x240	240	1	24,277	84	0,69
R3 (k.č.16)	R4 (k.č.16)	ANKOY 4x3x240	960	4	24,277	84	11,03
R3 (k.č.18)	T2/R100	CNKOP 8x3x120	960	8	24,277	127	25,22

Tab. 6-6: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R4 Trafopásek I

Odkud	Kam	Typ kabelu	Průřez	Počet	I_{th}	K	t_k
			(mm ²)	(-)	(kA)	(-)	(s)
R4 (k.č.03)	T4/R100	ANKOP 8x3x240	1920	8	24,052	84	44,96
R4 (k.č.04)	R13 (k.č.15)	ANKOP 4x3x240	960	4	24,052	84	11,24
R4 (k.č.05)	R13 (k.č.8)	ANKOY 4x3x240	960	4	24,052	84	11,24
R4 (k.č.06)	R14 (k.č.15)	10-AXEKCY 2x3x500	1000	2	24,052	93	14,95
R4 (k.č.22)	R9 (k.č.10)	ANKOY 1x3x240	240	1	24,052	84	0,7

Tab. 6-7: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R5 Teplárna

Odkud	Kam	Typ kabelu	Průřez	Počet	I_{th}	K	t_k
			(mm ²)	(-)	(kA)	(-)	(s)
R5 (k.č.08)	R24 (k.č.2)	6-AYKCY 2x3x240	480	2	22,944	75	2,46

Tab. 6-8: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R6 Teplárna

Odkud	Kam	Typ kabelu	Průřez	Počet	I_{th}	K	t_k
			(mm ²)	(-)	(kA)	(-)	(s)
R6 (k.č.02)	R5 (k.č.11)	AYKY 4x3x240	960	4	22,998	75	9,8
R6 (k.č.04).	R1 (k.č.15)	AYKCYM 4x3x240	960	4	22,998	75	9,8

Tab. 6-9: Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu - rozvodna R13 Trafopásek II

Odkud	Kam	Typ kabelu	Průřez	Počet	I_{th}	K	t_k
			(mm ²)	(-)	(kA)	(-)	(s)
R13 (k.č.02)	R12 (k.č.12)	ANKOP 2x3x240	480	2	23,918	84	2,84
R13 (k.č.03)	R16 (k.č.1)	AYKCY 1x3x240	240	1	23,918	75	0,57
R13 (k.č.07)	G1/R13 (komp.)	ANKOY 1x3x240	240	1	23,918	84	0,71
R13 (k.č.09)	R14 (k.č.1)	10-AXEKCY 2x3x500	1000	2	23,918	93	15,12
R13 (k.č.10)	R19 (k.č.14)	10-AXEKCY 4x3x240	960	4	23,918	93	13,93
R13 (k.č.11)	R11-2 (T2-R11)	ANKOP 1x3x95	95	1	23,918	84	0,11
R13 (k.č.16)	R5 (k.č.04)	ANKOP 4x3x240	960	4	23,918	84	11,37
R13 (k.č.12)	T5/R100	ANKOP 8x3x240	1920	8	23,918	84	45,47

7. ZÁVĚR

Úvodní teoretické kapitoly se věnují problematice napájení a provozování průmyslových sítí, popisují možnosti řešení, uspořádání rozvodných systémů. Vhodnost určitého řešení rozvodného systému lze posoudit tím, do jaké míry splňuje požadavky na rozvod a kvalitu elektrické energie. Rozhodující vliv na řešení rozvodných zařízení mají i přenášené výkony, velikost zkratových proudů a požadovaný stupeň zajištění dodávky elektrické energie. Elektrické rozvody musí být koncipovány tak, aby přenášené výkony a zkratové proudy byly v ekonomicky únosných mezích.

Následující část blíže definuje pravidla a postup výpočtu minimálních, maximálních zkratových proudů, určuje vztahy pro stanovení impedancí jednotlivých prvků a zkratových proudů podle ČSN EN 60909-0.

Stěžejním bodem diplomové práce byl výpočet maximálních a minimálních zkratových poměrů na všech rozvodnách vn průmyslového podniku pro čtyři různé varianty zapojení. Schéma jednotlivých variant zapojení jsou uvedeny v příloze. Při výpočtu náhradních prvků soustavy byla zavedena určitá zjednodušení, neboť u transformátorů, synchronních a asynchronních motorů jsem zanedbal jejich rezistanci. I při použití těchto zjednodušení jsou výsledky v dostatečné přesnosti. Výpočtem byly zjištěny dva různé zkratové proudy, které se liší svou velikostí. Maximální zkratový proud určuje zkratovou odolnost zařízení, kdežto minimální zkratový proud je základem pro volbu a nastavení ochran. Výsledky vypočítaných zkratových proudů a výkonů jsou v tabulkách v příloze, taktéž všechny potřebné parametry pro výpočet.

Posouzení zkratové odolnosti rozvodny vn bylo provedeno pouze pro rozvodny, pro které známe jejich jmenovitou hodnotu tab. 6-1. Všechny rozvodny vn z hlediska dovoleného zkratového výkonu vyhovují.

Kontrola průřezu kabelů vn na dovolené oteplení je nezbytná, neboť doba trvání zkratu je tak malá, že se vyvinuté teplo nestačí odvést a akumuluje se ve vodičích, které zvýší svou teplotu. Ochrany tedy musí vypnout každý zkratový proud dříve, než dojde k přehřátí jádra vodiče nad dovolenou maximální hranici. Předpokládaná doba vypnutí zkratových proudů ochranami je do 0,5 s. Tato doba zahrnuje dobu působení ochrany a dobu vypnutí vypínačem. Pro tento výpočet byl rozhodující ekvivalentní oteplovací zkratový proud a parametry kabelu, ze kterých byl následně určen koeficient K podle tab. 6-2. Ekvivalentní oteplovací zkratový proud byl vypočítán z maximálního počátečního souměrného zkratového proudu podle ČSN EN 60909-0 pro variantu č. 4, tedy pro největší zkratové proudy.

Maximální doby vypnutí zkratu pro kontrolované kabely jsou uvedeny v tab. 6-3 až 6-9. Kontrole průřezu vedení nevyhovují kabely napájející rozvodnu R11.

Tab. 7-1: Kabely nevyhovující kontrole na dovolené oteplení při zkratu

Odkud	Kam	Typ kabelu
R3 (k.č.03)	R11-1 (T1/R11)	ANKOP 1x3x120
R13 (k.č.11)	R11-2 (T2-R11)	ANKOP 1x3x95

LITERATURA

- [1] KRYCHTÁLEK Z., PAUZA J. *Elektrické stanice*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989. 416 s. ISBN 80-03-00075-0.
- [2] PAUZA J. *Silnoproudá rozvodná zařízení v průmyslu*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1974. 343 s.
- [3] HEJTMÁNKOVÁ P., ŠTROBLOVÁ M. *Elektrické sítě městské a průmyslové*. 1. vyd. ZČU Plzeň, 1994. 149 s. ISBN 80-7082-154-x.
- [4] ŠTROBLOVÁ M., TESAŘOVÁ M. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vyd. ZČU Plzeň, 2000. 154 s. ISBN 80-7082-703-3.
- [5] ORSÁGOVÁ J. *Rozvodná zařízení*. VUT Brno, 2004. [cit. 2016-2-16]
URL: < https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/!SZZ_2010/Rozvodna_zarizeni.pdf >
- [6] TOMAN P. a kol. *Provoz distribučních soustav*. 1. vyd. České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [7] ČSN 341610. Elektrotechnické předpisy ČSN. Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách. 1963.
- [8] PROCHÁZKA R. *Druhy elektrického silnoproudého rozvodu*, 2007. [cit. 2016-2-16]
URL: < <http://www.tzb-info.cz/4035-druhy-elektrického-silnoproudeho-rozvodu> >
- [9] HODINKA M., FECKO Š., NĚMEČEK F. *Přenos a rozvod elektrické energie*. SNTL Praha 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [10] MERTLOVÁ J., HEJTMÁNKOVÁ P., TAJTL T. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. 1. vyd. Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 80-7043-307-8.
- [11] ČSN EN 60909-0. Česká technická norma. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – část 0: Výpočet zkratových proudů. 2002.
- [12] MERTLOVÁ J., NOHÁČOVÁ L. *Elektrické stanice a vedení*. 1.vyd. ZČU Plzeň, 2008. 170 s. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [13] ROHLEDER L. *Jednopolové poruchy v síti nn a vn*. Ostrava, 2014. 63 s. Bakalářská práce na FEI VŠB-TU Ostrava. Vedoucí bakalářské práce doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký.
- [14] TROJÁNEK Z., HÁJEK J., KVASNICA P. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. SNTL/ALFA Praha 1987

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Minimální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 1	1
Příloha B: Minimální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 2.....	2
Příloha C: Minimální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 3	3
Příloha D: Minimální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 4	4
Příloha E: Maximální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 1	5
Příloha F: Maximální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 2	6
Příloha G: Maximální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 3.....	7
Příloha H: Maximální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 4.....	8
Příloha CH: Databáze asynchronních motorů, synchronních motorů a kompenzátorů	9
Příloha I: Databáze transformátorů	10
Příloha J: Databáze kabelů	11
Příloha K: Provozování vn rozvoden varianta č. 1.....	13
Příloha L: Provozování vn rozvoden varianta č. 2	13
Příloha M: Provozování vn rozvoden varianta č. 3	13
Příloha N: Provozování vn rozvoden varianta č. 4.....	13

Příloha A: Minimální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 1

Rozvodny	\underline{Z}	$ \underline{Z} $	$I''_{k\ 3\min}$	$S_{k\ 3\min}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
R1	0,0211+j0,284	0,2848	12,163	126,402
R2 = R3	0,0043+j0,2739	0,2739	12,647	131,431
R4	0,0054+j0,2572	0,2573	13,463	139,912
R5	0,0189+j0,2827	0,2833	12,228	127,077
R6	0,0183+j0,2823	0,2829	12,245	127,254
R8	0,0353+j0,2925	0,2946	11,759	122,203
R9	0,0493+j0,301	0,305	11,358	118,036
R11	0,1111+j0,308	0,3274	10,581	109,961
R12	0,0226+j0,2849	0,2858	12,121	125,965
R13 A	0,0052+j0,277	0,277	12,506	129,966
R13 B	0,0069+j0,2581	0,2582	13,416	139,423
R14	0,0121+j0,2663	0,2666	12,994	135,038
R16	0,3215+j0,4796	0,5774	5,999	62,343
R17	0,1055+j0,3434	0,3592	9,644	100,223
R19	0,0115+j0,2824	0,2826	12,258	127,389
R21	0,0469+j0,2995	0,3031	11,429	118,774
R22	0,0352+j0,296	0,2981	11,621	120,769
R23	0,0133+j0,2793	0,2796	12,389	128,75
R24	0,0292+j0,29	0,2915	11,884	123,502

Příloha B: Minimální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 2

Rozvodny	\underline{Z}	$ Z $	$I''_{k3\min}$	$S_{k3\min}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
R1	0,0312+j0,2939	0,2956	11,719	121,787
R2 = R3	0,0039+j0,2761	0,2761	12,547	130,392
R4	0,0054+j0,2572	0,2573	13,463	139,912
R5	0,0185+j0,2849	0,2855	12,133	126,09
R6	0,0179+j0,2845	0,2851	12,15	126,267
R8	0,0387+j0,2971	0,2996	11,562	120,156
R9	0,0489+j0,3032	0,3071	11,28	117,225
R11	0,1107+j0,3102	0,3294	10,516	109,285
R12	0,0222+j0,2871	0,288	12,028	124,999
R13 A	0,0052+j0,277	0,277	12,506	129,966
R13 B	0,0069+j0,2581	0,2582	13,416	139,423
R14	0,0121+j0,2663	0,2666	12,994	135,038
R16	0,3145+j0,4948	0,5863	5,908	61,398
R17	0,1156+j0,3533	0,3717	9,32	96,856
R19	0,0115+j0,2824	0,2826	12,258	127,389
R21	0,057+j0,3094	0,3146	11,011	114,43
R22	0,0453+j0,3059	0,3092	11,203	116,425
R23	0,039+j0,2986	0,3011	11,505	119,563
R24	0,0288+j0,2922	0,2936	11,799	122,619

Příloha C: Minimální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 3

Rozvodny	\underline{Z}	$ \underline{Z} $	$I''_{k3\min}$	$S_{k3\min}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
R1	0,0377+j0,2781	0,2806	12,345	128,293
R2 = R3	0,0039+j0,2761	0,2761	12,547	130,392
R4	0,0054+j0,2572	0,2573	13,463	139,912
R5	0,0238+j0,2683	0,2694	12,859	133,635
R6	0,0244+j0,2687	0,2698	12,84	133,437
R8	0,0387+j0,2971	0,2996	11,562	120,156
R9	0,057+j0,2882	0,2938	11,791	122,536
R11	0,0929+j0,2802	0,2952	11,735	121,954
R12	0,0172+j0,2643	0,2649	13,077	135,9
R13 A	0,0052+j0,277	0,277	12,506	129,966
R13 B	0,0069+j0,2581	0,2582	13,416	139,423
R14	0,0121+j0,2663	0,2666	12,994	135,038
R16	0,3215+j0,4796	0,5774	5,999	62,343
R17	0,1221+j0,3375	0,3589	9,652	100,307
R19	0,0115+j0,2824	0,2826	12,258	127,389
R21	0,0635+j0,2936	0,3004	11,532	119,844
R22	0,0518+j0,2901	0,2947	11,755	122,162
R23	0,0455+j0,2828	0,2864	12,095	125,695
R24	0,0341+j0,2756	0,2777	12,474	129,634

Příloha D: Minimální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 4

Rozvodny	\underline{Z}	$ \underline{Z} $	$I''_{k3\min}$	$S_{k3\min}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
R1	0,0316+j0,2917	0,2934	11,807	122,702
R2 = R3	0,0043+j0,2739	0,2739	12,647	131,431
R4	0,0081+j0,2762	0,2763	12,537	130,288
R5	0,0189+j0,2827	0,2833	12,228	127,077
R6	0,0183+j0,2823	0,2829	12,245	127,254
R8	0,0391+j0,2949	0,2975	11,644	121,008
R9	0,0493+j0,301	0,305	11,358	118,036
R11	0,1111+j0,308	0,3274	10,581	109,961
R12	0,0226+j0,2849	0,2858	12,121	125,965
R13 A	0,0052+j0,277	0,277	12,506	129,966
R13 B	0,0096+j0,2771	0,2773	12,492	129,821
R14	0,0148+j0,2853	0,2857	12,125	126,007
R16	0,3149+j0,4926	0,5847	5,925	61,574
R17	0,116+j0,3511	0,3698	9,368	97,355
R19	0,0115+j0,2824	0,2826	12,258	127,389
R21	0,0574+j0,3072	0,3125	11,085	115,199
R22	0,0457+j0,3037	0,3071	11,28	117,225
R23	0,0394+j0,2964	0,299	11,586	120,405
R24	0,0292+j0,29	0,2915	11,884	123,502

Příloha E: Maximální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 1

Rozvodny	\underline{Z}	$ Z $	$I''_{k3\max}$	$S_{k3\max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
R1	0,0196+j0,2137	0,2146	17,756	184,526
R2 = R3	0,0028+j0,2036	0,2036	18,716	194,502
R4	0,0031+j0,1819	0,1819	20,948	217,698
R5	0,0168+0,2121	0,2128	17,907	186,095
R6	0,0162+j0,2117	0,2123	17,949	186,531
R8	0,0338+j0,2222	0,2248	16,951	176,160
R9	0,0478+j0,2307	0,2356	16,174	168,085
R11	0,1096+j0,2377	0,2618	14,555	151,260
R12	0,0203+j0,2142	0,2152	17,707	184,017
R13 A	0,0041+j0,2307	0,2307	16,517	171,650
R13 B	0,0046+j0,1828	0,1829	20,834	216,513
R14	0,0098+j0,191	0,1913	19,919	207,004
R16	0,3109+j0,4033	0,5092	7,483	77,766
R17	0,104+j0,2731	0,2922	13,041	135,526
R19	0,0104+j0,2361	0,2363	16,126	167,586
R21	0,0454+j0,2292	0,2337	16,305	169,447
R22	0,0337+j0,2257	0,2282	16,698	173,531
R23	0,0118+j0,209	0,2093	18,206	189,202
R24	0,0267+j0,2191	0,2207	17,266	179,434

Příloha F: Maximální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 2

Rozvodny	\underline{Z}	$ \underline{Z} $	$I''_{k3\max}$	$S_{k3\max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
R1	0,0294+j0,2212	0,2231	17,08	177,501
R2 = R3	0,0026+j0,2037	0,2037	18,706	194,398
R4	0,0031+j0,1830	0,1830	20,822	216,389
R5	0,0166+j0,2122	0,2128	17,907	186,095
R6	0,0161+j0,2118	0,2124	17,94	186,438
R8	0,0374+j0,2247	0,2278	16,727	173,832
R9	0,0476+j0,2308i	0,2357	16,167	168,012
R11	0,1094+j0,2378	0,2618	14,555	151,260
R12	0,02+j0,2142	0,2151	17,715	184,1
R13 A	0,0041+j0,2307	0,2307	16,517	171,65
R13 B	0,0046+j0,1839	0,1840	20,709	215,214
R14	0,0098+j0,1921	0,1923	19,815	205,924
R16	0,3047+j0,421	0,5197	7,332	76,196
R17	0,1138+j0,2806	0,3028	12,584	130,777
R19	0,0104+j0,2361	0,2363	16,126	167,586
R21	0,0552+j0,2367	0,2431	15,675	162,899
R22	0,0435+j0,2332	0,2372	16,065	166,952
R23	0,0372+j0,2259	0,2289	16,647	173,001
R24	0,0265+j0,2192	0,2208	17,258	179,35

Příloha G: Maximální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 3

Rozvodny	\underline{Z}	$ \underline{Z} $	$I''_{k3\max}$	$S_{k3\max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
R1	0,0345+j0,1963	0,1993	19,119	198,69
R2 = R3	0,0028+j0,2134	0,2134	17,856	185,565
R4	0,0029+j0,1758	0,1758	21,675	225,253
R5	0,0206+j0,1865	0,1876	20,312	211,088
R6	0,0212+j0,1869	0,1881	20,258	210,527
R8	0,0376+j0,2344	0,2374	16,051	166,807
R9	0,0545+j0,2068	0,2139	17,814	185,129
R11	0,0903+j0,1987	0,2183	17,455	181,398
R12	0,0142+j0,1826	0,1832	20,8	216,16
R13 A	0,0041+j0,2307	0,2307	16,517	171,65
R13 B	0,0043+j0,1766	0,1767	21,565	224,11
R14	0,0095+j0,1848	0,1850	20,597	214,05
R16	0,3108+j0,3972	0,5043	7,556	78,524
R17	0,1189+j0,2557	0,282	13,512	140,421
R19	0,0104+j0,2361	0,2363	16,126	167,586
R21	0,0603+j0,2118	0,2202	17,305	179,839
R22	0,0486+j0,2083	0,2139	17,814	185,129
R23	0,0423+j0,201	0,205	18,588	193,172
R24	0,0305+j0,1936	0,196	19,441	202,037

Příloha H: Maximální zkratové proudy na rozvodnách vn varianta č. 4

Rozvodny	\underline{Z}	$ \underline{Z} $	$I''_{k3\max}$	$S_{3\max}$
	(Ω)	(Ω)	(kA)	(MVA)
R1	0,0288+j0,1777	0,18	21,17	220,005
R2 = R3	0,0019+j0,1601	0,1601	23,801	247,347
R4	0,0041+j0,1615	0,1616	23,58	245,051
R5	0,0161+j0,1686	0,1694	22,494	233,765
R6	0,0155+j0,1683	0,1690	22,547	234,315
R8	0,0367+j0,1811	0,1848	20,62	214,289
R9	0,0469+j0,1872	0,1930	19,744	205,186
R11	0,1087+j0,1942	0,2226	17,118	177,895
R12	0,0196+j0,1708	0,1719	22,167	230,366
R13 A	0,0041+j0,2307	0,2307	16,517	171,65
R13 B	0,0056+j0,1624	0,1625	23,449	243,689
R14	0,0108+j0,1706	0,1709	22,297	231,717
R16	0,3049+j0,3780	0,4856	7,847	81,548
R17	0,1132+j0,2371	0,2627	14,505	150,74
R19	0,0104+j0,2361	0,2363	16,126	167,586
R21	0,0546+j0,1932	0,2008	18,977	197,215
R22	0,0429+j0,1897	0,1945	19,591	203,596
R23	0,0366+j0,1824	0,1860	20,487	212,907
R24	0,026+j0,1758	0,1777	21,444	222,853

Příloha CH: Databáze asynchronních motorů, synchronních motorů a kompenzátorů

Asynchronní motory označení	Umístění	Výkon P	Napětí U_N	Proud I_N	Záběrný proud i_Z
		(kW)	(kV)	(A)	(-)
M1/R12	R12	500	6	58	6
M1/R16	R16	270	6	32,1	5
M31	R24	270	6	32,1	5
M41	R24	210	6	22,45	5

Synchronní motory označení	Výkon S	Výkon P	Napětí U	Proud I	Účinník $\cos \varphi$	Rázová reaktance x_d
	(kVA)	(kW)	(kV)	(A)	(-)	(%)
1DAP	6500	5300	6	625	0,85	16
2DAP	775	575	6	74,5	0,8	12

Synchronní kompenzátory označení	Umístění	Výkon Q	Napětí U	Proud I	Rázová reaktance x_d
		(Mvar)	(kV)	(A)	(%)
G1/R3	R3	3	6	289	10
G1/R13	R13	2,66	6	257	15

Příloha I: Databáze transformátorů

Umístění transformátoru	Výkon S	Primární proud I_1	Sekundární proud I_2	Napětí nakrátko u_k	Ztráty nakrátko ΔP_k	Ztráty naprázdno ΔP_θ	Množství oleje
	(MVA)	(A)	(A)	(%)	(W)	(W)	(kg)
T1 – R100	16	84	1 470	11,15	101 769	35 000	16 600
T2 – R100	16	84	1 470	11,05	136 300	41 200	20 000
T4 – R100	16	84	1 470	10,20	137 200	42 200	20 000
T5 – R100	16	84	1 470	11,15	136 300	39 300	16 600

Příloha J: Databáze kabelů

Odkud	Kam	Typ kabelu	Délka l	Rezistance R_K	Reaktance X_K
			(m)	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
R1 (k.č.01)	R17 (k.č.1)	AYKCY 1x3x240	1350	0,125	0,088
R1 (k.č.05)	R23 (k.č.1)	ANKOP 4x3x240	241	0,129	0,0776
R1 (k.č.08)	R22 (k.č.01)	AXEKCY 4x3x240	450	0,125	0,107
R1 (k.č.09)	R21 (k.č.1)	ANKOY 1x3x240	420	0,129	0,0776
R1 (k.č.16)	R21 (k.č.2)	ANKOY 2x3x240	382	0,129	0,0776
R1 (k.č.19)	R17 (k.č.2)	AYKCY 1x3x240	1350	0,125	0,088
R1 (k.č.20)	R24 (k.č.1)	6-AYKCY 2x3x240	351	0,125	0,088
R2 (k.č.22)	R8 (k.č.1)	ANKOY 1x3x240	240	0,129	0,0776
R2 (k.č.24)	T1/R100	ANKOY 8x3x240	239	0,129	0,0776
R2 (k.č.25)	R6 (k.č.3)	ANKOP 4x3x240	435	0,129	0,0776
R3 (k.č.03)	R11-1 (T1/R11)	ANKOP 1x3x120	414	0,258	0,0823
R3 (k.č.04)	G1/R3 (komp.)	ANKOY 1x3x240	30	0,129	0,0776
R3 (k.č.06)	R8 (k.č.7)	ANKOY 1x3x240	270	0,129	0,0776
R3 (k.č. 07)	R23(k.č.2)	ANKOY 4x3x240	280	0,129	0,0776
R3 (k.č.11)	R16 (k.č.5)	AYKCY 1x3x240	2485	0,125	0,088
R3 (k.č.13)	R12 (k.č.1)	ANKOP 2x3x240	283	0,129	0,0776
R3 (k.č.14)	R4 (k.č.14)	ANKOP 4x3x240	118	0,129	0,0776
R3 (k.č.15)	R9 (k.č.1)	ANKOY 1x3x240	349	0,129	0,0776
R3 (k.č.16)	R4 (k.č.16)	ANKOY 4x3x240	120	0,129	0,0776
R3 (k.č.18)	T2/R100	CNKOP 8x3x120	220	0,1566	0,0823
R4 (k.č.03)	T4/R100	ANKOP 8x3x240	333	0,129	0,0776
R4 (k.č.04)	R13 (k.č.15)	ANKOP 4x3x240	41	0,129	0,0776
R4 (k.č.05)	R13 (k.č.8)	ANKOY 4x3x240	45	0,129	0,0776
R4 (k.č.06)	R14 (k.č.15)	10-AXEKCY 2x3x500	220	0,06	0,094
R4 (k.č.22)	R9 (k.č.10)	ANKOY 1x3x240	400	0,129	0,0776
R5 (k.č.08)	R24 (k.č.2)	6-AYKCY 2x3x240	165	0,125	0,088

PŘÍLOHY

Odkud	Kam	Typ kabelu	Délka l	Rezistance R_K	Reaktance X_K
			(m)	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
R6 (k.č.02)	R5 (k.č.11)	AYKY 4x3x240	18	0,125	0,088
R6 (k.č.04).	R1 (k.č.15)	AYKCYM 4x3x240	425	0,125	0,088
R13 (k.č.02)	R12 (k.č.12)	ANKOP 2x3x240	159	0,129	0,0776
R13 (k.č.03)	R16 (k.č.1)	AYKCY 1x3x240	2517	0,125	0,088
R13 (k.č.07)	G1/R13 (komp.)	ANKOY 1x3x240	20	0,129	0,0776
R13 (k.č.09)	R14 (k.č.1)	10-AXEKCY 2x3x500	174	0,06	0,094
R13 (k.č.10)	R19 (k.č.14)	10-AXEKCY 4x3x240	200	0,125	0,107
R13 (k.č.11)	R11-2 (T2-R11)	ANKOP 1x3x95	264	0,3259	0,0838
R13 (k.č.16)	R5 (k.č.04)	ANKOP 4x3x240	525	0,129	0,0776
R13 (k.č.12)	T5/R100	ANKOP 8x3x240	325	0,129	0,0776

Příloha K: Provozování vn rozvoden varianta č. 1

Tento výkres je na samostatném listě volně vložen do diplomové práce.

Příloha L: Provozování vn rozvoden varianta č. 2

Tento výkres je na samostatném listě volně vložen do diplomové práce.

Příloha M: Provozování vn rozvoden varianta č. 3

Tento výkres je na samostatném listě volně vložen do diplomové práce.

Příloha N: Provozování vn rozvoden varianta č. 4

Tento výkres je na samostatném listě volně vložen do diplomové práce.